



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2012

**João Ricardo de
Almeida Salvado**

**Congelamento de solos - Estudo dos efeitos da
salinidade**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2012

**João Ricardo de
Almeida Salvado**

Congelamento de solos - Estudo dos efeitos da salinidade

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho Benta, Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
professora associada da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

À minha Tia Sílvia e ao meu Padrinho José Francisco por todo o apoio demonstrado ao longo deste percurso universitário, pela atenção e carinho que sempre me deram e pelas palavras de incentivo nos momentos mais difíceis.

Às minhas primas Francisca e Filipa, por todos os momentos de descontração que me proporcionaram e por todos os momentos que vivemos juntos.

À minha namorada pelo incentivo e disponibilidade constantes nesta última caminhada.

Ao professor Doutor Agostinho Benta, pela orientação e partilha de conhecimentos.

Ao mestre Luís Barbosa pelo acompanhamento prático que me serviu de forte ajuda durante a realização dos ensaios experimentais.

A todos os meus amigos que de uma forma mais ou menos ativa participaram neste longo percurso académico.

Finalmente aos meus pais por todas as palavras, gestos, confiança, paciência e apoio que sempre me transmitiram e sem os quais nada disto seria possível.

palavras-chave

Estabilização temporária, melhoramento de solos, congelamento artificial, modelação, ensaios laboratoriais.

Resumo

Com o presente trabalho propõe-se divulgar e explorar a técnica de congelação artificial de solos. Numa primeira parte, é apresentada a técnica, como funciona, quais as suas vantagens e limitações e que parâmetros influenciam as propriedades de um solo congelado. Numa etapa posterior do trabalho, são realizados ensaios laboratoriais, onde se efetua o congelamento de uma areia em 3 fases, cada uma delas com um diferente teor de sal. Os resultados obtidos na fase de ensaios são comparados com um modelo teórico, obtido com o auxílio do software de modelação TEMP/W. Seguidamente, avaliam-se os resultados obtidos, quer nos ensaios realizados com diferentes teores de sal, quer para os provenientes da comparação entre o modelo real e o modelo teórico. Por fim, é feita uma análise no sentido de aferir se esta técnica se revela economicamente rentável ou não.

keywords

Temporary stabilization, soil improvement, artificial freezing, modelling, laboratory tests

Abstract

The present work aims to disseminate and exploit the technique of artificial soil freezing. In the first part, the technique is presented, is shown how it works, its advantages and limitations and which parameters influence the properties of a frozen soil. At a later stage, laboratory tests are performed on a freezing sand divided into 3 phases, each one with a different salt content. The results obtained in the phase of these tests are compared with the ones we get of a theoretical model, obtained with the support of a modelling software called TEMP/W. Thereafter, we evaluate the results obtained, either for the tests carried out with different salt contents, or to those from the comparison between the real and the theoretical model. Finally, an analysis is made in order to see if this process is economically viable or not.

ÍNDICE

Índice.....	I
Índice de Figuras.....	V
Índice de Tabelas	IX
Simbologia.....	XI
1- Introdução.....	1
1.1- Motivação	1
1.2- Enquadramento teórico	1
1.3- Objetivos	2
1.4- Estrutura do Trabalho	3
2- Congelamento de solos.....	5
2.1- Introdução	5
2.2- Princípio do congelamento	7
2.2.1- Comportamento do solo congelado	7
2.2.2- Campos de Aplicação	9
2.3- Exemplos reais de aplicação da técnica.....	10
2.3.1- Projeto Marmaray em Istambul	10
2.3.2- Estação de metro de Brandenburg Tor U 55	11
2.4- Vantagens, desvantagens e limitações.....	14
2.5- Equipamentos.....	14
2.6- Refrigerantes usados no congelamento	15
2.6.1- Salmoura	15
2.6.2- Nitrogénio líquido.....	16
2.7- Métodos de congelamento	17
2.7.1- Procedimento de circuito fechado	17
2.7.2- Procedimento de circuito aberto	17
2.7.3- Procedimento misto	18
2.8- Processos de execução	18
3- Programa Temp/W	21
3.1- Introdução	21
3.2- Estabilização de solos - Análise TEMP/W	22
3.3- Modelos dos materiais pré-definidos pelo software	23

3.3.1-	Teor de água descongelada	24
3.3.2-	Condutividade térmica	26
3.3.3-	Capacidade térmica volumétrica	28
3.3.4-	Conteúdo volumétrico de água no solo.....	29
4-	Ensaio Experimentais em solos congelados.....	31
4.1-	Ensaio Triaxial	31
4.1.1-	High-Pressure Low-Temperature (HPLT) Triaxial Test Cell	33
4.2-	Ensaio de fluxo de permeabilidade ao ar	34
4.3-	Ensaio Pressiométrico.....	35
4.3.1-	Execução do ensaio.....	37
4.3.2-	Perturbações na realização do ensaio.....	38
4.3.3-	Calibrações	39
4.3.4-	Determinação de parâmetros mecânicos.....	39
4.3.4.1-	Retificação da leitura de pressão	39
4.3.4.2-	Retificação da leitura de volume	40
4.3.4.3-	Representação da curva característica	41
4.3.4.4-	Determinação do Módulo Pressiométrico de Menard e do Módulo de Elasticidade	41
4.4-	Ensaio CBR (California Bearing Ratio)	43
4.5-	Ensaio de Pré-Consolidação.....	44
4.6-	Ensaio com o Dilatómetro de Marchetti	45
5-	Propriedades dos solos congelados	49
5.1-	Processo de congelamento	49
5.2-	Teor de água e salinidade.....	51
5.3-	Volume de água não congelada.....	52
5.4-	Condutividade térmica.....	52
5.4.1-	Mecanismo de congelamento das areias	53
6-	Ensaio Laboratoriais	57
6.1-	Descrição geral.....	57
6.2-	Equipamento de Congelamento da Universidade de Aveiro	58
6.3-	Características do solo a ensaiar.....	61
6.3.1-	Análise Granulométrica	61
6.3.1.1-	Classificação Unificada da Areia	63
6.3.1.2-	Classificação para fins rodoviários.....	64

6.3.2-	Densidade das partículas	64
6.3.3-	Baridade	66
6.3.4-	Teor em água	67
6.3.5-	Percentagem de vazios	68
6.4-	Ensaio realizado e procedimentos respetivos.....	69
6.4.1-	Primeira Fase - Congelamento com 0g de sal por Kg de areia	69
6.4.2-	Segunda Fase - Congelamento com 1,5g de sal por Kg de areia	69
6.4.3-	Terceira fase - Congelamento com 3,0g de sal por Kg de areia.....	74
6.5-	Tratamento de dados.....	77
6.5.1-	Análise comparativa entre as três fases de ensaio	77
6.5.1.1-	Temperatura Vs Tempo.....	78
6.5.1.2-	Diâmetro efetivo dos bolbos	79
6.5.1.3-	Temperaturas vencidas	80
6.5.1.4-	Consumo Energético.....	80
6.6-	Ensaio do modelo teórico com a ajuda do software TEMP/W	82
6.6.1-	Caraterísticas do reservatório	82
6.6.2-	Condições fronteira do modelo	83
6.6.3-	Propriedades da areia e do isolamento.....	85
6.6.4-	Resultados obtidos na modelação teórica para um período de 20 dias.....	86
6.7-	Tratamento de dados.....	89
6.7.1-	Análise comparativa entre a 2ª fase do ensaio real Vs Modelação Teórica.....	89
6.7.1.1-	Dados recolhidos no modelo teórico	90
6.7.1.2-	Comparação entre os dados teóricos Vs dados reais	90
6.8-	Discussão	92
7-	Conclusões e Desenvolvimentos futuros.....	97
7.1-	Conclusões gerais	97
7.2-	Desenvolvimentos futuros	98
	Referências Bibliográficas	101
	Anexos.....	105
	Anexo I - Condutividade Térmica de alguns materiais.....	105
	Anexo II - Capacidade Térmica Volumétrica de alguns materiais.....	106
	Anexo III - Registo de Temperaturas (1ª Fase)	107
	Anexo IV - Registo de Temperaturas (2ª Fase)	108
	Anexo V - Registo de Temperaturas (3ª Fase)	109

Anexo VI - Registo de temperaturas no modelo teórico	110
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Contenção periférica (CONSTRUCTOR).	5
Figura 2- Interior do túnel Marmaray (CDM).....	10
Figura 3- Reforço das paredes de periferia do túnel no projeto Marmaray (CDM)	11
Figura 4- Fases do projeto do metro de Bradenburg (GUD).....	11
Figura 5- Fase Final Metro Bradenburg (BAYER et al., 2010)	13
Figura 6- Micro-túneis com tubos de salmoura (GUD)	13
Figura 7- Processo de congelamento com salmoura (adaptado de: BAYER et al., 2010).	15
Figura 8- Processo de congelamento com nitrogénio líquido (adaptado de: BAYER et al., 2010).....	16
Figura 9- Bolbo de congelamento em torno do tubo de salmoura (adaptado de: KRAHN, 2004).....	23
Figura 10- Gráfico representativo da quantidade de energia existente num processo de congelamento/descongelamento (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).	25
Figura 11- Valores caraterísticos do teor de água não congelada em função da temperatura para alguns tipos de solo (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).	26
Figura 12- Valores caraterísticos da condutividade térmica em função da temperatura para alguns tipos de solo (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).....	27
Figura 13- Valores caraterísticos da condutividade térmica em função do volume de água da amostra de solo para alguns tipos de solo (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).	28
Figura 14- Valores caraterísticos da capacidade térmica volumétrica em função do conteúdo de volume de água numa amostra (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).	29
Figura 15- Equipamento para realização do ensaio triaxial (FERNANDES, 1994).	31
Figura 16- Pormenor do equipamento para realização do ensaio triaxial (FERNANDES, 1994).....	32
Figura 17- Esquema da câmara de teste e do material que incorpora a o equipamento HPLT (adaptado de: MOO Y. LEE, 2002).	33

Figura 18- Equipamento de refrigeração externo incorporado no equipamento HPLT (MOO Y. LEE, 2002).	34
Figura 19- Equipamento para ensaiar o fluxo de permeabilidade ao ar (adaptado de: AL-HOURI, 2008).....	35
Figura 20- Esquema geral de um pressiómetro (SILVA, 2001).....	36
Figura 21- Ilustração dos elementos constituintes do pressiómetro de Ménard (SCHNAID, 2000).	37
Figura 22- Correção da altura piezométrica (VIEIRA, 2009).	39
Figura 23-Curva típica de um ensaio pressiométrico (adaptado de: YU et al., 2002)....	41
Figura 24- Equipamento para ensaio CBR em provetes de solo congelados (adaptado de: HAZIRBABA et al., 2010).....	44
Figura 25- Equipamento para ensaio de pré-consolidação (adaptado de: QI et al., 2010).	45
Figura 26- Equipamento utilizado num ensaio com o Dilatómetro de Marchetti (GEOCIÊNCIAS).	47
Figura 27- Gráfico com a curva representativa de um sistema de congelamento (adaptado de: BING et al., 2011).....	51
Figura 28- Mecanismo de congelamento de uma areia (adaptado de: ARENSON et al., 2004).....	53
Figura 29- Mecanismo de congelamento em solos salinos (adaptado de: ARENSON et al., 2004).	54
Figura 30- Equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro	59
Figura 31 - Sistema de arrefecimento da Universidade de Aveiro	59
Figura 32 - Esquema do equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro (BENTA et al., 2010).....	60
Figura 33 - Tubos de congelamento em aço inox.....	60
Figura 34 - Sonda de cima e sonda de fundo para registo de temperaturas	61
Figura 35- Agitador de peneiros (GRAVIMETA)	62
Figura 36- Curva granulométrica.....	63
Figura 37- Picnómetro com água até ao traço de referência	65
Figura 38- Planta do reservatório R1 com a colocação das sondas	70
Figura 39- Esquema de colocação das sondas.....	70
Figura 40 - Disposição dos tubos de congelamento	71
Figura 41- Mistura da água com o sal.....	71

Figura 42- Colocação da sonda 1 de fundo	72
Figura 43- Final da preparação do ensaio (2ª fase).....	72
Figura 44- Início do processo de congelamento (2ª fase)	72
Figura 45- Formação de um bolbo próximo do tubo de congelamento - 8º dia	73
Figura 46- Bolbos formados com o congelamento da areia (2ª fase).	73
Figura 47- Medição do diâmetro superior do bolbo resultante do congelamento.....	73
Figura 48- Medição do diâmetro na zona intermédia do bolbo resultante de congelamento.....	74
Figura 49- Início do congelamento (3ª fase).	75
Figura 50- Primeiro dia do congelamento (3ª fase).	75
Figura 51- Formação do bolbo em torno do tubo de congelamento (15º dia).....	76
Figura 52- Bolbos formados com o congelamento da areia (3ª fase).	76
Figura 53- Medição do diâmetro superior de um dos bolbos resultantes do congelamento.....	77
Figura 54- Medição do diâmetro na zona intermédia de um dos bolbos resultante do congelamento.....	77
Figura 55- Gráfico Temperatura Vs Tempo para os 3 teores de sal diferentes - Sonda 1 Fundo.....	78
Figura 56- Gráfico Temperatura Vs Tempo para os 3 teores de sal diferentes - Sonda 1 Cimo	78
Figura 57- Gráfico Temperatura Vs Tempo para os 3 teores de sal diferentes - Sonda 3 Fundo.....	79
Figura 58- Gráfico Temperatura Vs Tempo para os 3 teores de sal diferentes - Sonda 3 Cimo	79
Figura 59- Planta do reservatório R1 com o corte AA'.....	83
Figura 60- Condições fronteira impostas no modelo.....	84
Figura 61- Condições fronteira iniciais.....	85
Figura 62- Condições fronteira finais	85
Figura 63- Situação inicial do congelamento do reservatório R1 com areia.....	87
Figura 64- Situação de congelamento do reservatório R1 com areia após 1 dia.....	87
Figura 65- Situação de congelamento do reservatório R1 com areia após 5 dias	88
Figura 66- Situação de congelamento do reservatório R1 com areia após 10 dias	88
Figura 67- Situação final de congelamento do reservatório R1 com areia após 20 dias	89
Figura 68- Gráfico Temperatura Vs Tempo - sonda 1 cimo	90

Figura 69- Gráfico Temperatura Vs Tempo - Sonda 1 fundo.....	90
Figura 70- Gráfico Temperatura Vs Tempo - Sonda 3 cimo	91
Figura 71- Gráfico Temperatura Vs Tempo - sonda 3 fundo	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Determinação do parâmetro αp , factores reológicos para vários tipos de solos (VIEIRA, 2009).	43
Tabela 2- Efeito de diversas variáveis na resistência de um solo congelado (adaptado de: ARENSON et al., 2007).	55
Tabela 3- Valores da temperatura de congelamento da água (°C) em função da salinidade da água (%) (adaptado de: DEVELOPMENT).....	58
Tabela 4- Pesagens iniciais da areia.....	62
Tabela 5- Resultados do processo de peneiração para a análise granulométrica	63
Tabela 6- Cálculo da massa volúmica das partículas.....	66
Tabela 7- Capacidade mínima do recipiente em função da dimensão máxima do agregado	66
Tabela 8 - Cálculo da baridade do solo	67
Tabela 9 -Cálculo do teor em água	68
Tabela 10- Diâmetros efetivos dos bolbos resultantes do congelamento para cada uma das fases de ensaio.....	80
Tabela 11- Temperaturas vencidas em cada uma das fases de ensaio e nas diferentes sondas	80
Tabela 12- Consumo energético para a 1ª fase de ensaio	81
Tabela 13- Consumo energético para a 2ª fase de ensaio	81
Tabela 14- Consumo energético para a 3ª fase de ensaio	81
Tabela 15- Condutividade térmica de alguns materiais (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).	105
Tabela 16- Capacidade térmica volumétrica de alguns materiais (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).....	106
Tabela 17- Registo de temperaturas da 1ª fase de ensaio (0,0 g de sal por Kg de areia).	107
Tabela 18- Registo de temperaturas da 2ª fase de ensaio (1,5 g de sal por Kg de areia).	108
Tabela 19- Registo de temperaturas da 3ª fase de ensaio (3,0 g de sal por Kg de areia).	109
Tabela 20- Dados sonda 1 cimo - modelo teórico	110

Tabela 21- Dados sonda 1 fundo - modelo teórico	111
Tabela 22- Dados sonda 3 cimo - modelo teórico	112
Tabela 23- Dados sonda 3 fundo - modelo teórico	113

SIMBOLOGIA

K -	Condutividade térmica
UU -	Ensaio triaxial não consolidado não drenado
CU -	Ensaio triaxial consolidado não drenado
CD -	Ensaio triaxial consolidado drenado
HPLT-	High-pressure low-temperature Triaxial Test Cell
PBPM -	Preboring Pressuremeter
SBPM -	Selfboring Pressuremeter
DCPM -	Driven Cone Pressuremeter
PCPM -	Pushed Cone Pressuremeter
PSPM -	Pushed Shelby Tube Pressuremeter
PMT -	Pressiómetro de Ménard
ASTM -	American Society for Testing and Materials
NF -	Norma Francesa
E_p -	Módulo Pressiométrico
P_F -	Pressão Fluência
P_L -	Pressão Limite
D -	Diâmetro
P -	Pressão real aplicada no solo;
P_m -	Pressão lida no manómetro da unidade de controlo;
P_i -	Pressão Hidrostática;
P_c -	Pressão obtida aquando da calibração por perda de pressão (pressão de retenção da membrana)
γ_w -	Peso volúmico da água (9,81 kN/m ³)
ρ_w -	Densidade da água (1)
Z -	Distância do ponto médio da sonda ate ao solo
a -	Altura de água no pressiometro
V -	Volume real corrigido;
V_m -	Volume lido na unidade de controlo;
V_c -	Volume determinado aquando da calibração da sonda (compressibilidade da mesma).
P_0 -	Pressão inicial no solo congelado

ΔP -	variação de pressão na fase entre P_0 e P_f
ΔV -	variação de volume na fase entre V_0 e V_f
V_s -	volume inicial da sonda
V_m -	volume médio no troço entre V_0 e V_f
ν -	coeficiente de poisson
G -	módulo de rigidez
E -	módulo de elasticidade
E_p -	módulo pressiométrico
α_p -	parâmetro reológico determinado na Tabela 1.
CBR -	California Bearing Racio
DMT -	Dilatómetro de Marchetti
T_{ns} -	Temperatura nucleação espontânea
T_f -	Temperatura de congelamento da água pura
R1 -	Reservatório 1
R2 -	Reservatório 2
R3 -	Reservatório 3
NP -	Norma Portuguesa
C_u -	Coeficiente de uniformidade
C_c -	Coeficiente de curvatura
D_{10} , D_{30} e D_{60} -	Diâmetro efetivo a 10, 30 e 60% respetivamente
LNEC -	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
ρ_p -	Massa volúmica das partículas
ρ_b -	Baridade
w -	Teor em água
v' -	Porcentagem de vazios

1- INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo será feita uma breve descrição do trabalho desenvolvido, no qual se apresenta a motivação para o seu desenvolvimento, o seu enquadramento teórico, tal como os objetivos e a estrutura utilizada.

1.1- Motivação

A motivação encontrada para o desenvolvimento do presente documento prende-se com o facto de ser cada vez mais recorrente a utilização da técnica de congelamento de solos e, consequentemente, ser de extrema importância o desenvolvimento de trabalhos de investigação que explorem esta técnica com o objetivo de se conseguir um melhor controlo e gestão de recursos bem como uma maior rentabilidade do processo.

1.2- Enquadramento teórico

O congelamento de solos é uma prática especial no campo da Engenharia Civil, que explora as propriedades do solo artificial congelado garantindo-lhe maior estabilidade e/ou capacidade de prevenir a infiltração de águas subterrâneas.

Segundo HELMUT et al. (2005), para a realização de um congelamento de solo pode recorrer-se a vários processos de congelamento envolvendo nitrogénio líquido, salmoura, ou um misto dos dois últimos.

Esta tecnologia encontra aplicação em projetos de construção tais como:

- ✓ Túneis;
- ✓ Obras de reabilitação;
- ✓ Barreiras de contenção periféricas.

Para se aplicar este tipo de tecnologia, é necessário efetuar um estudo prévio do local onde se irá implementar esta técnica de forma a ter, antecipadamente, um conhecimento complexo das propriedades térmicas, mecânicas e hidráulicas do solo a congelar, do equipamento a ser usado e, ainda, avaliar qual o processo de construção mais correto para se usar (JOHN et al., 2003) .

Para os engenheiros, a vantagem de congelamento do solo é o facto de o mesmo ficar com características impermeáveis e a sua estabilidade aumentar significativamente. O

congelamento do solo é uma especialidade utilizada essencialmente na construção subterrânea, caracterizada pela segurança e fiabilidade de todo o processo. Quando um projeto de congelamento do solo estiver concluído, não existem resíduos deste no local. Assim sendo, a tecnologia de congelamento é reconhecida para proteger as águas subterrâneas e é também um método ambientalmente seguro (SCHULTZ et al., 2008).

1.3- Objetivos

Depois de um primeiro contacto com o conceito de congelamento de solos, pretende-se através de ensaios laboratoriais e do uso de um programa de modelação, estudar os parâmetros geotécnicos de uma areia congelada. Para tal teremos primeiro que:

- ✓ avaliar as características geotécnicas da areia;
- ✓ com o auxílio do equipamento de congelamento, congelar a areia.

Depois de concluídas as etapas atrás referidas, podemos então avaliar distintos parâmetros de uma areia congelada, tais como:

- ✓ Variação da temperatura;
- ✓ Variações volumétricas;
- ✓ Gasto energético efetivo necessário para realizar o congelamento.

Assim, procura-se aperfeiçoar e melhorar o conhecimento da técnica de congelamento de solos. Pretende-se também efetuar o paralelismo com a realidade para se perceber se podemos aplicar esta técnica com sucesso e segurança para uma melhor estabilização temporária do solo, bem como para um controlo de fluxo de águas subterrâneas.

Finalmente, outro dos objetivos é o de efetuar uma modelação teórica, utilizando para tal um software de modelação. Com os dados retirados do software e com os dados retirados do ensaio em laboratório pretende-se comparar os mesmos por forma a verificar se o modelo teórico apresenta resultados fiáveis. Desta forma, posteriormente, será possível estudar e avaliar características de outros tipos de materiais que tenham a necessidade de ser congelados.

1.4- Estrutura do Trabalho

A presente dissertação está organizada em 7 capítulos e 6 anexos, dispostos da seguinte forma:

- ✓ Capítulo 1- No presente capítulo, relativo à introdução da dissertação, realiza-se o enquadramento do tema e são também apresentados os objetivos propostos no trabalho. Finalmente, é apresentada a estrutura e organização da dissertação.
- ✓ Capítulo 2- O segundo capítulo é dedicado aos diferentes processos de congelamento de solos, os seus princípios de execução, vantagens e limitações desta técnica. São ainda apresentados alguns exemplos reais, onde o processo de congelamento de solos foi aplicado.
- ✓ Capítulo 3- No terceiro capítulo, faz-se uma breve introdução ao software de modelação TEMP/W. Este software será utilizado nesta dissertação numa fase posterior, para efetuar a modelação de um reservatório de congelamento artificial do laboratório do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.
- ✓ Capítulo 4- O capítulo quatro incide nos ensaios experimentais que podem ser realizados em solos congelados, por forma a serem conhecidas as propriedades e o comportamento dos mesmos.
- ✓ Capítulo 5- No quinto capítulo, são apresentadas algumas características dos solos congelados e como variam as suas propriedades de acordo com a variação de alguns parâmetros.
- ✓ Capítulo 6- O sexto capítulo dedica-se em exclusivo aos ensaios laboratoriais realizados. Neste é apresentado o equipamento de congelamento de solos sito no laboratório do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. São também expostas as propriedades do solo que será o caso de estudo do presente documento. É também calibrado o modelo teórico com o auxílio do

software de modelação referido no capítulo 3. Posteriormente são discutidos e analisados todos os resultados retirados dos ensaios realizados.

- ✓ Capítulo 7- Finalmente no sétimo capítulo, apresentam-se as conclusões gerais e comentários finais relativos a todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação, e são apresentadas sugestões e propostas para que sejam desenvolvidos trabalhos no futuro relacionados com a temática do congelamento de solos

2- CONGELAMENTO DE SOLOS

2.1- Introdução

Algumas obras subterrâneas apresentam problemas na sustentação provisória das escavações. Devido a este facto, e em certos países em que as baixas temperaturas prevalecem, foi desenvolvida a técnica de congelação artificial do solo (Figura 1). Não há, no entanto, registo da utilização desta técnica em Portugal, em virtude do clima do nosso país ser temperado. É também uma técnica pouco utilizada devido à necessidade da alta tecnologia associada e aos custos financeiros que acarreta.



Figura 1- Contenção periférica (CONSTRUCTOR).

Esta técnica de melhoramento de carácter provisório pode ser definida como o método de congelamento artificial do terreno, convertendo a água intersticial em gelo, melhorando as propriedades mecânicas do solo e tornando o solo impermeável.

O processo implica remover o calor do maciço, para causar uma queda de temperatura do subsolo abaixo do ponto de congelamento da humidade dos poros intersticiais. Esta humidade comporta-se como agente de cimentação, ligando as partículas do solo entre

si, propiciando uma rede estrutural de apoio à massa de solo. O calor é removido para a atmosfera por arrefecimento, circulando em tubos colocados entre a superfície e a zona a congelar. Os materiais que permitem a concretização desta técnica são o azoto líquido, a salmoura e o dióxido de carbono.

Esta técnica inovadora de estabilização de solos foi desenvolvida e utilizada na Alemanha em 1883, para a abertura de poços em solos de minas de carvão (SCHULTZ et al., 2008). Contudo, existe quem defenda que esta surgiu na Suécia.

Na atualidade, é provavelmente a única que consegue criar uma barreira á prova de água com uma percentagem de impermeabilização perto dos 100%, e fornecer uma elevada capacidade de carga. Inevitavelmente, e sabendo “*à priori*” que o mundo da engenharia está envolvido num processo de recuperação contínua do equilíbrio paisagístico, esta técnica assume o seu valor positivo no aspeto de não ter impactos ambientais, surgindo, portanto, um aumento na sua procura em diferentes tipos e locais de aplicação (SCHULTZ et al., 2008).

De acordo com ALMEIDA (2003), os principais fatores a ter em conta na realização de congelamento de solos, que condicionam o grau de congelamento artificial do terreno, são:

- ✓ Tempo de congelamento e temperatura do terreno;
- ✓ Condições geológicas e hidrogeológicas da zona a tratar;
- ✓ Tipos de solos presentes;
- ✓ Propriedades mecânicas, térmicas e quantidade de água no solo;
- ✓ Nível freático (posição e sua oscilação);
- ✓ Temperatura e velocidade de circulação da água.

2.2- Princípio do congelamento

A correta utilização da técnica de congelamento de solos depende da presença de água para criar gelo, cimentando as partículas e aumentando os parâmetros de resistência do mesmo garantindo uma maior estabilidade. No caso da humidade não preencher todos os poros do solo será necessário adicionar água.

Em pedra ou argila, o gelo pode construir ou ampliar fissuras, causando assim um aumento da permeabilidade após o descongelamento (CRISTELO, 2001).

Existindo um fluxo de água contínuo a percorrer o solo a ser congelado, o tempo de congelamento aumenta em função do fornecimento contínuo de energia térmica e, se o fluxo for grande e a temperatura da água alta, o congelamento pode ficar completamente inibido.

Como em todas as técnicas de tratamento de solo, o correto levantamento do local e morfologia do solo é necessário para escolher o tipo de sistema de congelamento a utilizar e a melhor disposição para criar uma matriz uniforme de solo congelado.

Após o congelamento inicial estar concluído, a barreira de contenção congelada uniformemente e no local correto, a capacidade de refrigeração necessária é significativamente reduzida, servindo apenas para manter o solo devidamente congelado.

Como o congelamento pode ser imposto de uma forma uniforme sobre uma vasta tipologia de solos numa única operação, em terrenos com granulometria diversificada este método oferece maior segurança face a um tratamento de injeção de caldas diversificadas.

2.2.1- Comportamento do solo congelado

O comportamento do solo congelado, quando carregado, é significativamente diferente de um solo não congelado, uma vez que no primeiro caso o solo aumenta a sua resistência ao corte, a sua rigidez e diminui a sua permeabilidade. Este tipo (estado) de solo está sujeito à fluência e a efeitos de relaxamento, com o seu comportamento muito afetado pelas alterações de temperatura. Em relação ao gelo, e no que respeita ao seu comportamento viscoelástico, este está dependente de fatores como a salinidade,

pressão, taxa de deformação, orientação cristalina e densidade. Assim sendo, todos os casos de estudo devem ser bem observados para se poder considerar todos os parâmetros, tirando o máximo benefício da técnica em questão.

O fluxo das águas subterrâneas pode ter um impacto importante no sistema de congelamento. Este fluxo proporciona uma fonte contínua de calor, e pode atrasar o processo de congelamento do solo e, no pior caso, este pode alcançar um equilíbrio térmico onde o congelamento é interrompido/cessado. Como referência, as velocidades de fluxo efetivo (velocidade de escoamento) menores de 2 metros por dia, no caso da utilização de salmoura, e de 4 a 6 metros por dia, no caso do uso do azoto líquido, não têm qualquer efeito na parede/solo congelada. No caso de velocidades maiores que as anteriores devem ser tomadas medidas adicionais nas condições do projeto em particular, assegurando a rápida formação da zona de congelamento (SCHULTZ et al., 2008).

Os solos congelados possuem uma ductilidade muito reduzida, fraturando sob a ação de cargas permanentes, sendo que os melhoramentos conseguidos com o congelamento são dependentes do tempo. Além disso, os parâmetros dependem da temperatura, o que significa que quer o tempo quer a temperatura devem ser considerados na avaliação das propriedades mecânicas dos solos congelados. As propriedades mecânicas do solo congelado dependem mais do tempo de congelação e da temperatura do solo do que da natureza dos terrenos envolvidos no tratamento (CRISTELO, 2001).

No que respeita ao cálculo da extensão da área de solo congelada junto ao tubo de congelação, segundo IMPE (1989), este pode ser efetuado tendo em consideração as condições de percolação “*in situ*”, o tipo de solo, a variação das propriedades térmicas do solo durante a redução da temperatura (condutibilidade e calor específico), a distância entre os tubos de congelação e a variação do nível freático durante o processo. Uma maneira de evitar a grande expansão do solo, quando a água passa do estado líquido para o estado sólido, é incutir ao processo uma elevada velocidade de congelação, em que se não for assim o solo pode expandir mais de 9% em relação ao seu volume inicial (CRISTELO, 2001).

2.2.2- Campos de Aplicação

Após uma prévia contextualização sobre a técnica de congelamento de solos, é importante referir quais as suas principais aplicações.

Segundo ALMEIDA (2003) e BAYER et al. (2010), as principais aplicações desta técnica são:

- ✓ Túneis;
- ✓ Realização de reforços por poços atravessando camadas granulares sob o nível freático cujo esgotamento ou encerramento seria impossível de outro modo;
- ✓ Escavações temporárias sob muros ou sapatas que entrariam em colapso ao não dar maior resistência ao terreno de apoio das mesmas na área de trabalho;
- ✓ Contenções periféricas;
- ✓ Estabilização em superfície;
- ✓ Extração de amostras;
- ✓ Descontaminação de solos.

Resumidamente as principais aplicações da técnica são em contenções periféricas, escavações em aquíferos, escavações em poços profundos, escavações extensas, escavações em túneis e cortinas de impermeabilização. Esta técnica pode também ser utilizada em aplicações ambientais, estabilização de solos moles e escoramento de estruturas existentes.

Por vezes, combina-se este tratamento com uma injeção prévia do terreno já que, se existe água em circulação no solo, a operação de congelamento torna-se muito complicada. A congelação artificial adequa-se a uma enorme diversidade de solos, inclusive em casos onde as injeções e outros métodos não podem ser utilizados.

2.3- Exemplos reais de aplicação da técnica

2.3.1- Projeto Marmaray em Istambul



Figura 2- Interior do túnel Marmaray (CDM)

O Projeto Marmaray em Istambul é atualmente um dos maiores projetos de transporte no mundo. Cerca de 2,5 mil milhões de euros serão investidos num túnel ferroviário sob o estreito de Bósforo e na modernização das vias de transporte. O túnel de 13,6 quilómetros de comprimento passará sob o centro de Istambul e sob o Estreito de Bósforo para interligar a Europa à Ásia. Uma ideia que existe há 150 anos vai então tornar-se numa realidade.

O túnel passa sob o Estreito de Bósforo 56 metros abaixo do nível do mar. Antes de se colocar a máquina de perfuração no local (estação de Üsküdar), foram detetados defeitos no bloco de vedação e na abertura da parede, quantidades consideráveis de água e solo foram fluindo para o local de escavação. A fim de colocar a perfuradora com um diâmetro de 7,93m com segurança no local de escavação pretendido, usou-se a tecnologia de congelamento de solos com o intuito de criar uma barreira de contenção na periferia do local de escavação. A empresa CDM foi responsável pelo planeamento e execução do congelamento do solo e, também, monitorização das atividades procedentes.

Devido ao curto espaço de tempo e de forma a facilitar toda a operação, optou-se por uma técnica de congelamento do solo, utilizando nitrogénio líquido em furos com um

comprimento aproximado de 3,5m em torno da área da perfuradora. Isto permitiu que a parede fosse perfurada em segurança e colocada uma estrutura de aço embutido em betão como entrada. Efetuou-se o descongelamento e a perfuradora foi capaz de entrar com segurança nos últimos metros do túnel. Esta técnica foi novamente utilizada para expandir a entrada. De acordo com o projeto prevê-se que a obra seja finalizada em 2014.



Figura 3- Reforço das paredes de periferia do túnel no projeto Marmaray (CDM)

2.3.2- Estação de metro de Brandenburg Tor U 55

No centro de Berlim, nas imediações do Brandenburg, e rodeado por edificações importantes, foi construída uma estação de metro, sob a proteção da técnica de congelamento de solos.

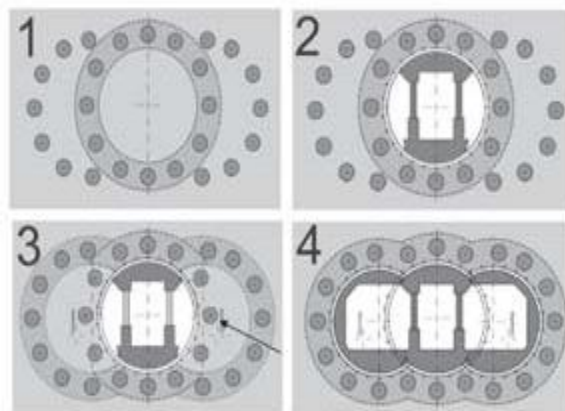


Figura 4- Fases do projeto do metro de Bradenburg (GUD)

O projeto de construção foi realizado mediante uma carta de direção do túnel principal, bem como duas extensões em paralelo com o mesmo. Para proceder à colocação dos tubos de congelamento, 30 micro-túneis com um diâmetro de 1600 mm e comprimento de 90 m, são dispostos em torno da secção de escavação (Figura 5 e Figura 6). Devido ao preenchimento dos micro-túneis com argamassa, os tubos de congelamento são condutores de calor e integram-se no solo de uma maneira muito eficaz.

Para a operação de congelamento, serão usados um total de quatro unidades de refrigeração em cascata, com uma capacidade instalada de 1200 kW de refrigeração. O circuito, com cerca de 90 metros cúbicos de salmoura, é realizado a uma velocidade de vazão de cerca de 300 m³/h. A temperatura da água salgada (salmoura) na alimentação dos tubos de congelamento será da ordem dos -38°C (BAYER et al., 2010).

Para uma otimização inovadora da construção, oito micro-túneis localizados na secção transversal da escavação, são preenchidos com água. Durante a fase de manutenção e de encapsulamento do túnel central, esta água é integrada no sistema estático como gelo. Antes de o congelamento se dar nos micro-túneis laterais, os que estão preenchidos com água são aquecidos por um sistema de aquecimento, de forma a poderem ser retirados os tubos já existentes, sendo possível a escavação das partes laterais. Deste modo, as dificuldades durante o processo de remoção dos micro-túneis são evitadas, bem como vibrações envolvidas no processo construtivo.

Este projeto é extremamente importante para a cidade de Berlim. Por outro lado, os moradores e residentes da área, por exemplo os do Hotel Adlon, ou mesmo da embaixada Húngara, não são perturbados pelas obras. Desta forma, existe grande pressão para que este processo de congelamento se desenvolva rapidamente num futuro bastante próximo (BAYER et al., 2010).

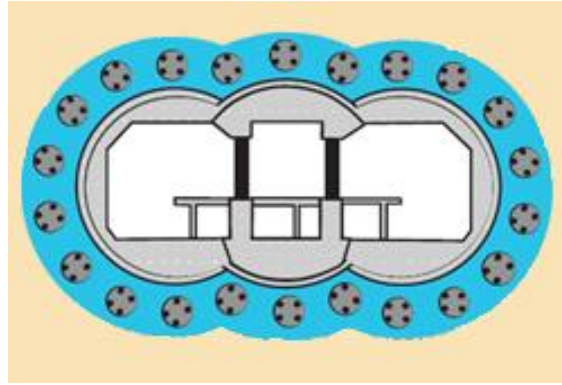


Figura 5- Fase Final Metro Brandenburg (BAYER et al., 2010)



Figura 6- Micro-túneis com tubos de salmoura (GUD)

Neste projeto utilizou-se a técnica de congelamento de solos com salmoura para suporte da escavação temporária, em que os tubos de salmoura foram inseridos em 30 micro túneis e o volume de congelamento atingido foi de 40,000 m³. O projeto envolveu uma área de 500 m² e foi executado a uma profundidade de 22 metros.

2.4- Vantagens, desvantagens e limitações

As grandes vantagens da congelação artificial de solos são segundo ALMEIDA (2003):

- ✓ Rapidez de execução;
- ✓ Pouco sensível ou dependente das condições geológicas do terreno;
- ✓ Após a sua utilização pode remover-se integralmente todo o sistema;
- ✓ Permite a continuação do uso de infraestruturas existentes sem interrupções no seu funcionamento;
- ✓ Provoca poucas vibrações e ruído, o que permite a sua aplicação junto de edifícios existentes.

Como principal desvantagem e/ou limitação, a congelação artificial do terreno tem o facto de ser uma tecnologia especializada de elevado custo, sobretudo o seu custo de manutenção.

2.5- Equipamentos

Segundo ALMEIDA (2003) são necessários os seguintes equipamentos por forma a iniciar o congelamento de um solo de forma artificial:

- ✓ Equipamento de refrigeração composto por evaporador, compressor e condensador atuante sobre um fluido de refrigeração;
- ✓ Tubagem de circulação de fluido em circuito fechado, aberto ou misto que percorre as tubos de congelamento instalados no terreno;
- ✓ Material para isolamento térmico do circuito e solo tratado;
- ✓ Equipamento de colocação das sondas e tubos.

2.6- Refrigerantes usados no congelamento

2.6.1- Salmoura

O congelamento com salmoura requer a utilização de equipamentos de refrigeração como mostra a Figura 7. O equipamento de refrigeração está ligado a um sistema de arrefecimento, que consiste numa bomba de água salgada, colocada à superfície e tubos de congelamento instalados no terreno, por forma a congelar o solo, diminuindo a sua temperatura. Os tubos de congelamento são fechados, geralmente feitos em aço. No interior do tubo de congelamento, coloca-se um tubo de polietileno, onde irá circular o refrigerante.

A salmoura, usualmente, cloreto de cálcio, é bombeada seguindo pelo tubo de polietileno até à sua profundidade máxima. No seu retorno, a solução arrefece o tubo de congelamento e por sua vez aquece, devido ao calor existente no solo, voltando à estação de refrigeração para ser novamente arrefecida, para voltar aos tubos de congelamento, continuando assim o processo de congelamento.

A temperatura produzida no equipamento de congelamento com salmoura varia entre os -20°C e os -40°C . Se o equipamento de refrigeração for corretamente dimensionado, de acordo com o volume de solo a congelar, as temperaturas no solo congelado podem atingir valores na ordem dos -10°C a -20°C (JOHN et al., 2003).

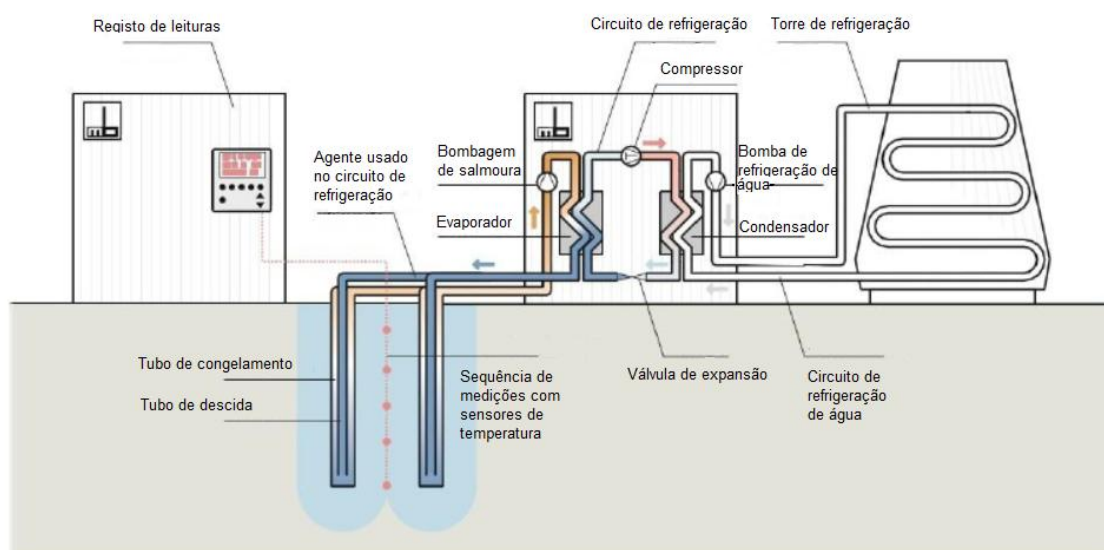


Figura 7- Processo de congelamento com salmoura (adaptado de: BAYER et al., 2010).

2.6.2- Nitrogénio líquido

O processo de congelamento com nitrogénio líquido (Figura 8) é um processo no qual o calor latente do solo é extraído através da vaporização direta do fluido criogénico (LN₂) nos tubos de congelamento. O tubo de congelamento é feito, usualmente, em cobre ou aço. No interior do tubo de congelamento, coloca-se um tubo interior em cobre, onde irá circular o nitrogénio.

A alimentação do nitrogénio líquido é feita através de um reservatório de armazenamento "in situ" ou através de um camião tanque. O nitrogénio líquido é inserido no tubo interior, dando-se um choque térmico que provoca a vaporização do nitrogénio a uma temperatura de -196°C, provocando o arrefecimento do solo, ao mesmo tempo que absorve o calor latente deste, resultando daí o congelamento do solo. A exaustão dos gases libertados durante o processo é controlada por uma válvula de duas vias, que abre/fecha de acordo com temperaturas base pré-estabelecidas. As temperaturas registadas nos gases de exaustão variam entre os 100 ± 30 °C (JOHN et al., 2003).

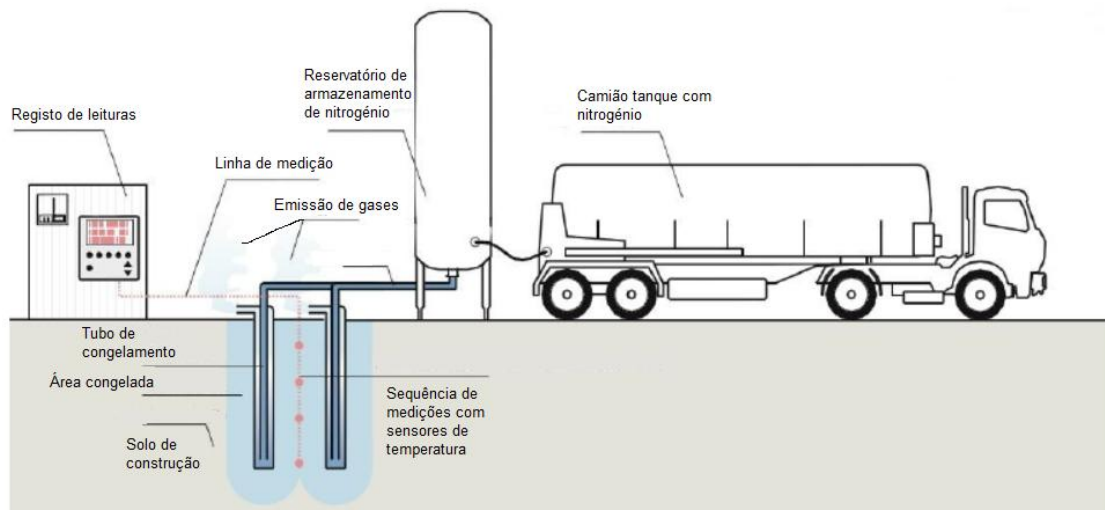


Figura 8- Processo de congelamento com nitrogénio líquido (adaptado de: BAYER et al., 2010).

2.7- Métodos de congelamento

Antes de se avançar para o processo de execução propriamente dito, importa esclarecer as diversas abordagens que existem para a execução do método. Existem três tipos de procedimento de congelação do terreno que serão apresentados de seguida.

2.7.1- Procedimento de circuito fechado

Neste tipo de procedimento o material utilizado é a salmoura, à qual é imposta a temperatura desejada em equipamento próprio, que promove a bombagem do fluido para os tubos de congelação em circuito fechado. Este é um método considerado indireto, pois o equipamento de arrefecimento da salmoura debita a energia necessária para arrefecer a salmoura de forma constante, congelando a zona envolvente de cada tubo que vai aumentando até se formar uma parede de gelo resistente. Depois de criada esta parede, o caudal bombeado pode diminuir, transmitindo apenas frio suficiente para que a parede se mantenha intacta.

Este método tem como principal vantagem o seu menor custo, apesar de precisar de mais tempo para atingir a formação da referida parede (CARVALHO, 2010).

2.7.2- Procedimento de circuito aberto

Neste tipo de procedimento o fluido refrigerante utilizado é o nitrogénio líquido, que circula em grupos de tubos ligados em série que mais tarde descarregam para a atmosfera.

O nitrogénio líquido é utilizado neste tipo de procedimento devido à maior capacidade que este refrigerante tem de transmitir frio ao terreno, permitindo constituir um “muro” de solo congelado artificialmente num curto período de tempo. Neste processo com nitrogénio líquido, existe menos espaço entre os tubos de congelação e estes têm menor diâmetro. O gás não é tóxico, no entanto, devem ser tomadas precauções para que não se acumule em espaços fechados. Quando se realiza uma congelação deve-se ter cuidado, pois o aumento de volume não deve exceder o 1% (CARVALHO, 2010).

Este processo revela uma série de vantagens:

- ✓ Os custos de investimento são menores;
- ✓ A instalação do processo pode ser efetuada em poucos dias;
- ✓ Devido à baixa temperatura, a formação do bloco de solo congelado processa-se em poucos dias;
- ✓ O bloco de solo congelado a esta temperatura é 100% impermeável à água.

2.7.3- Procedimento misto

Neste tipo de procedimento dá-se a combinação dos dois procedimentos anteriormente descritos, aproveitando a maior capacidade refrigerante de nitrogénio líquido, acelerando o processo com a economia da salmoura. Neste caso, os circuitos são preparados para que se possam utilizar ambos os procedimentos apresentados.

2.8- Processos de execução

Segundo CARVALHO (2010), torna-se importante referir as etapas pressupostas pelo processo de congelamento artificial:

- ✓ Seleção do procedimento de congelação do terreno e respetivo material a utilizar de acordo com reconhecimento geotécnico e hidrogeológico do local de intervenção;
- ✓ Instalação de equipamento, preparação do terreno e acoplamento de tubos de refrigeração;
- ✓ Instalações de sondas, que serão isoladas nas zonas que não serão intervencionadas;
- ✓ Colocação de tubos, onde irá circular o fluído refrigerante;

- ✓ No interior do circuito de refrigeração, estimula-se a circulação de fluido a baixa temperatura durante o tempo necessário à formação dum cilindro congelado que alargará o seu raio até atingir o diâmetro desejado;
- ✓ Execução de escavação no interior da contenção, após formada a camada de gelo que irá suportar a escavação em segurança;
- ✓ Execução da estrutura de contenção;
- ✓ No final da execução da contenção são extraídos os tubos de circulação de fluido, voltando o solo ao seu estado inicial.

3- PROGRAMA TEMP/W

Neste capítulo pretende-se introduzir o software TEMP/W, visando demonstrar quais as suas principais vantagens e limitações. Sendo este um software de análise térmica, procura-se analisar o comportamento dos materiais quando sujeitos a alteração de temperaturas para, numa situação real, conseguir prever qual o comportamento dos solos, se sujeitos a temperaturas tais que originem o congelamento dos mesmos, utilizando um software com as características do TEMP/W.

3.1- Introdução

O software TEMP/W da Geo-Slope International Ltd, é um software de elementos finitos que pode ser usado para modelar as mudanças térmicas no solo, devido às mudanças ambientais. A formulação abrangente deste programa torna possível analisar os problemas geotérmicos, quer simples, quer altamente complexos, com ou sem temperaturas que resultem no congelamento ou descongelamento solo.

O TEMP/W pode ser usado com SEEP/W para modelar o efeito da água e a sua mudança de fase ao longo de um intervalo de temperaturas, no entanto, é incapaz de “compreender” a ligação física, extremamente complexa e pouco compreendida entre a água, gelo, ar e solo durante o congelamento.

Outra hipótese inerente a todas as análises TEMP/W é que o teor de água não muda durante a mesma. O solo não precisa de estar saturado, no entanto, o teor de água total é assumido como um valor fixo.

Também é possível modelar situações onde não há humidade no solo, o que significa que o TEMP/W pode realmente ser usado para transferência de calor através de qualquer tipo de material poroso ou sólido. A transferência de calor em materiais sólidos é realmente um caso muito mais simplificado do que o TEMP/W consegue analisar. O foco principal de análise é a transferência de calor através de meios porosos contendo solo, água, gelo e ar ao mesmo tempo (KRAHN, 2004).

3.2- Estabilização de solos - Análise TEMP/W

Para muitos projetos de engenharia geotécnica é necessária a escavação em solos. O congelamento do solo é, por vezes, usado antes da escavação propriamente dita, para proporcionar uma melhor estabilização do mesmo. Para que um sistema de congelamento possa ser utilizado com sucesso *"in situ"* devem ser definidos:

- ✓ número apropriado de poços onde colocar os tubos de congelamento;
- ✓ correta colocação dos tubos de congelamento;
- ✓ os requisitos de fluxo de energia;
- ✓ requisitos de tempo de congelamento;
- ✓ cobertura de zonas congeladas.

O programa TEMP/W é uma ferramenta útil para se conseguirem obter valores estimados de todos os parâmetros enunciados anteriormente, porque o processo de congelamento do solo pode ser modelado com estes dados específicos ainda numa fase de projeto da obra.

A Figura 9 mostra os resultados da modelação de congelamento através de eixos simétricos, em torno de um tubo de salmoura único usando TEMP/W. Este exemplo particular pode ser usado para estimar os requisitos de fluxo de energia, tempo de congelamento e cobertura de congelação para um único poço. Uma análise de eixos simétricos funciona corretamente para um tubo de congelamento único, mas congelar múltiplos tubos implica que a modelação seja feita em planta para mostrar a inter-relação entre tubos adjacentes e o crescimento da parede congelada, após adjacentes colunas congeladas estarem ligadas (KRAHN, 2004).

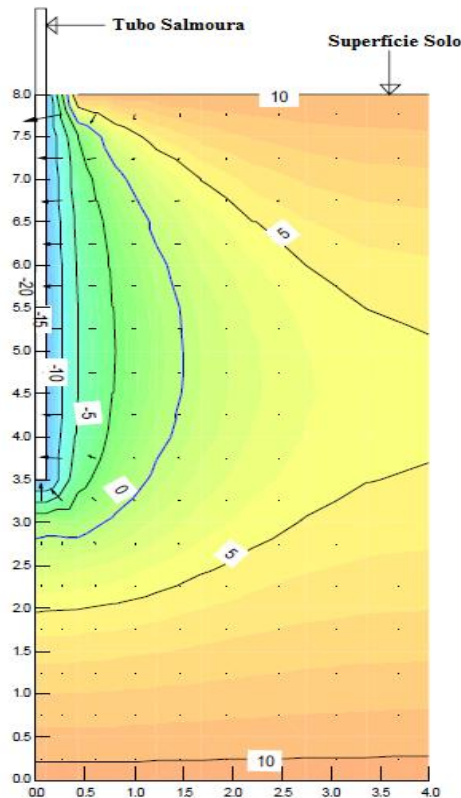


Figura 9- Bolbo de congelamento em torno do tubo de salmoura (adaptado de: KRAHN, 2004).

Observando os resultados da modelação, depois de ver resolvido o problema geotérmico, TEMP/W oferece muitas ferramentas para visualização dos resultados. Ferramentas essas, tais como, gerar contornos ou parcelas xy de qualquer parâmetro calculado, temperatura, radiação de fluxo, gradiente ou calor latente. Finalmente, podemos exportar os resultados para outras aplicações, tais como Microsoft Excel ou Word, para posterior análise ou para preparar apresentações.

3.3- Modelos dos materiais pré-definidos pelo software

Segundo o manual do software GEO-SLOPE INTERNATIONAL (2012), por pré-definição, existem cinco modelos de materiais que podem ser usados numa análise TEMP/W, que são:

- ✓ Modelo livre;
- ✓ Modelo térmico simplificado;
- ✓ Modelo térmico completo;
- ✓ Modelo térmico acoplado convexo (análise em conjunto com SEEP/W);
- ✓ Modelo de Interface.

Quando se pretende definir uma região de solo sem que esta se inclua na análise térmica a ser feita, usa-se um modelo livre.

Por outro lado, o modelo térmico completo é o modelo tradicionalmente usado pelo software e, neste, determinadas propriedades dos materiais a serem utilizados na modelação têm que ser especificadas, tais como a condutividade térmica e a quantidade de água não congelada. A análise só é válida, assumindo que o teor de água é constante ao longo de todo o processo.

No modelo térmico acoplado convexo, a análise térmica não depende somente da temperatura, mas também, do teor de água. O teor de água pode variar durante a análise, no entanto tem de se acoplar uma análise conjunta entre o TEMP/W e o SEEP/W quando tal acontece.

O modelo de interface é usado para analisar pequenos isolamentos ou barreiras ao fluxo de calor no interior do solo.

Finalmente, no modelo de análise térmica simplificada, assume-se que a mudança de fase num material ocorre a uma determinada temperatura única, em vez de ocorrer ao longo de um intervalo de temperaturas, esta última situação só é analisada quando se utiliza o modelo térmico completo.

O modelo utilizado foi o modelo térmico simplificado no qual têm que ser especificados os seguintes parâmetros:

- ✓ Conteúdo volumétrico de água "*in situ*";
- ✓ Condutividade térmica do material congelado e descongelado;
- ✓ Capacidade térmica volumétrica do material congelado e descongelado.

3.3.1- Teor de água descongelada

Para o modelo utilizado, o valor do teor de água descongelada não tem influência, uma vez que se considera que toda a quantidade de água existente muda de estado a uma determinada temperatura, em vez dessa mesma variação se dar ao longo de um intervalo de temperaturas, no entanto, é útil referir qual o impacto do teor de água descongelada, caso se utilizasse um outro modelo, como por exemplo, o modelo térmico completo.

Assim sendo, num processo de congelamento o software analisa como é que a quantidade de energia existente no solo varia de acordo com a mudança de temperatura.

Como mostra a Figura 10, a parte mais íngreme do gráfico representa o calor latente absorvido ou libertado relativo às mudanças de fase da água no solo. Por outro lado, o declive da parte inicial e final do gráfico representa a capacidade térmica volumétrica da zona do solo congelada e descongelada respetivamente.

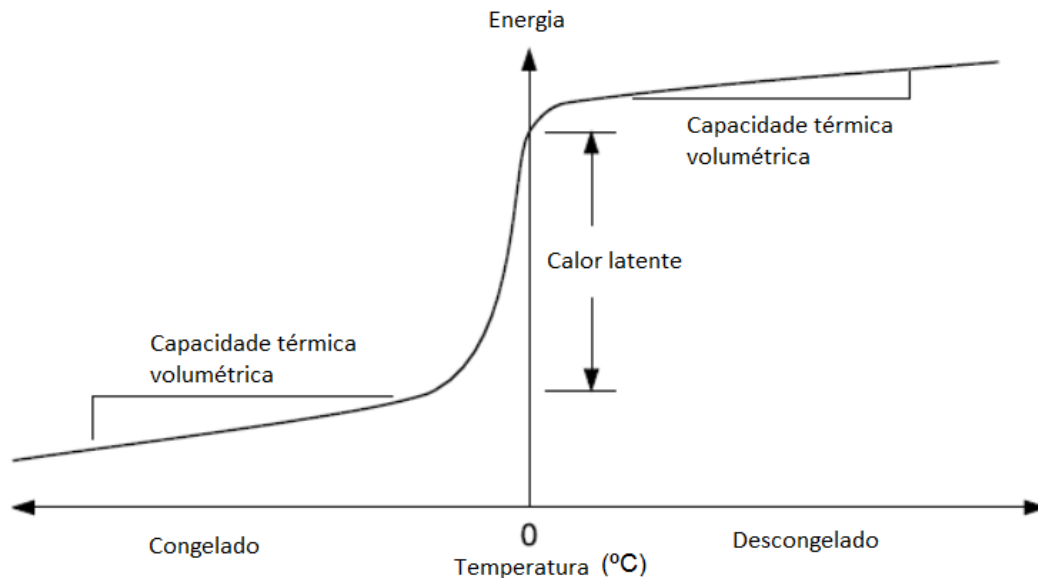


Figura 10- Gráfico representativo da quantidade de energia existente num processo de congelamento/descongelamento (adaptado de: (GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).

Ao contrário de um meio onde apenas exista água pura, quando esta se encontra no interior de um solo muda de fase segundo um intervalo de temperaturas. Isto é, a globalidade da água existente no solo, não muda de fase a uma única temperatura, sendo a percentagem de volume de água não congelada existente no solo a uma certa temperatura denominada por teor de água descongelada. Na Figura 11 mostram-se alguns exemplos do teor de água descongelada em função da temperatura para alguns materiais, sendo em geral a curva representativa muito íngreme em solos de granulometria grossa, ao invés dos solos finos onde esta tem uma inclinação menos acentuada. Se a curva representativa apresenta um declive muito íngreme isto significa que toda a água não congelada existente congela a uma temperatura ligeiramente abaixo de 0°C. Se o declive for menos acentuado significa então, que a água não congelada

ainda se encontra presente no solo, para temperaturas inferiores à temperatura de congelamento, isto é, para temperaturas entre os -2°C e -4°C .

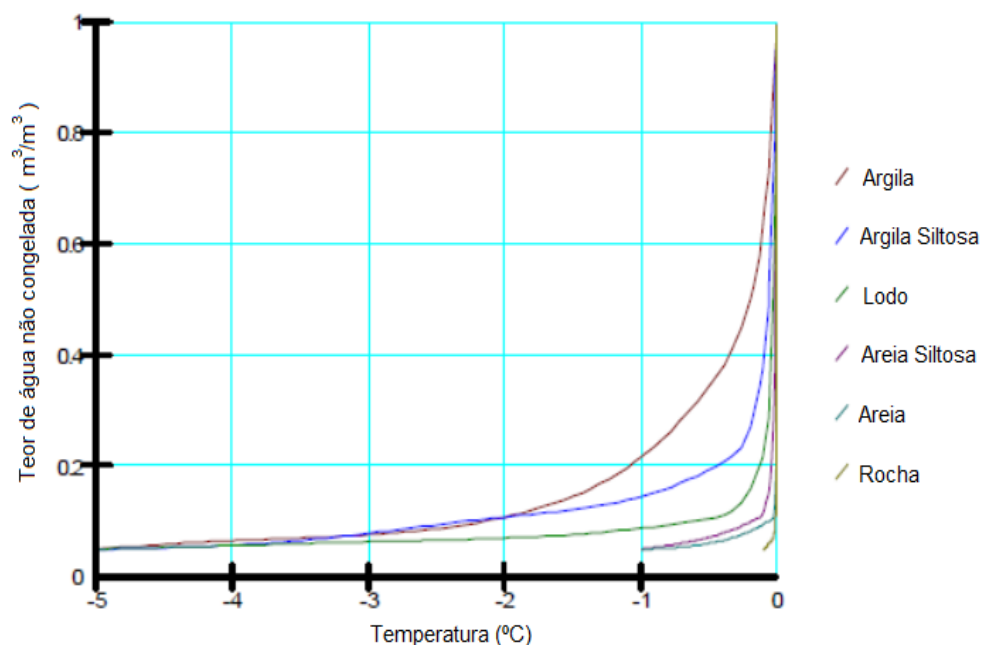


Figura 11- Valores caraterísticos do teor de água não congelada em função da temperatura para alguns tipos de solo (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).

3.3.2- Condutividade térmica

A condutividade térmica, K , que caracteriza a habilidade de um solo transmitir calor por condução, é definida como a quantidade de calor que flui através de uma unidade de área de um solo médio, com espessura unitária, numa determinada unidade de tempo e sob um gradiente de temperatura unitário. As unidades usadas no sistema são $\text{J}/(\text{seg}.\text{m}^{\circ}\text{C})$, $\text{kJ}/(\text{dia}.\text{m}^{\circ}\text{C})$ ou $\text{Btu}/(\text{hora}.\text{ft}^{\circ}\text{F})$.

A temperaturas acima de 0°C , a condutividade térmica tende a aumentar com o aumentar do teor de água. A temperaturas abaixo de 0°C , normalmente a condutividade térmica é maior do que para um solo não congelado, tal se explica pelo facto da condutividade térmica do gelo ser bastante superior à da água. A condutividade térmica

de um solo congelado é um parâmetro altamente dependente da quantidade de água não congelada existente no interior do mesmo.

Em solos de granulometria grossa, a condutividade térmica assume valores elevados, enquanto que em solos finos, esta assume valores mais baixos.

Aumentar o valor da condutividade térmica faz com que a taxa a que a temperatura desce até ao ponto de congelamento, e após a mudança de fase, também aumente (GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).

Na Figura 12, podemos encontrar alguns valores característicos da condutividade térmica de determinados tipos de solos, em função da temperatura, bem como em função do volume de água na amostra como mostra a Figura 13. Relativamente a outros materiais, os seus valores característicos da condutividade térmica encontram-se presentes no manual de apoio do software bem como no Anexo I- Condutividade Térmica de alguns materiais do presente documento.

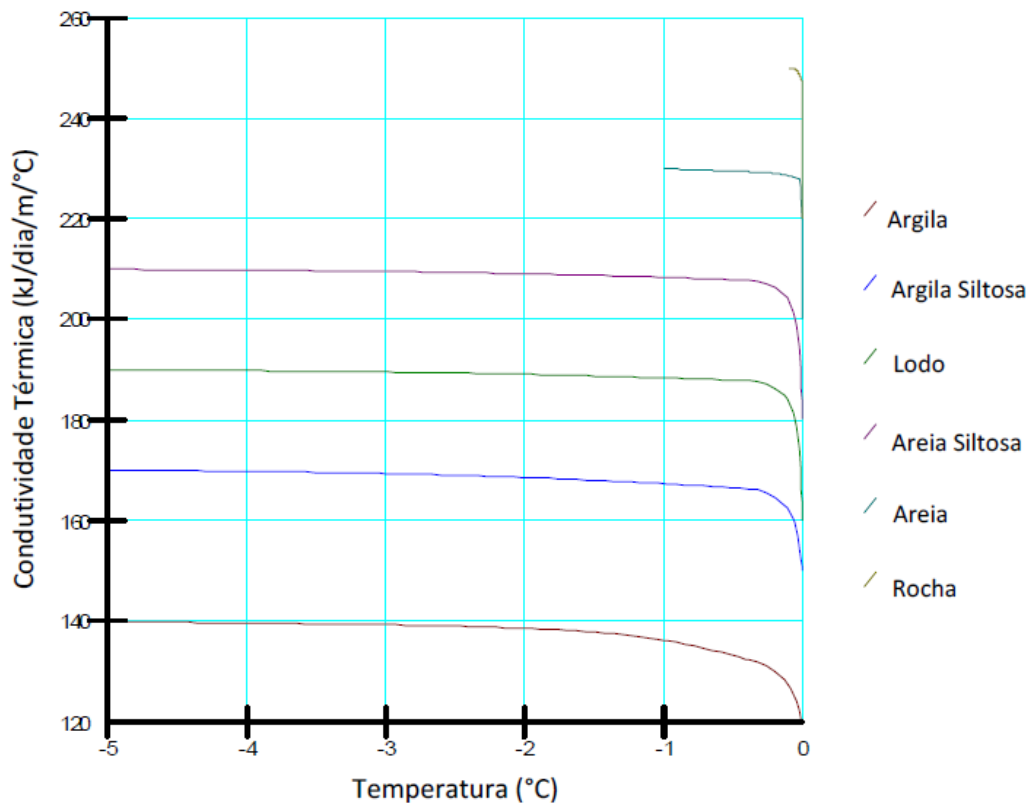


Figura 12- Valores caraterísticos da condutividade térmica em função da temperatura para alguns tipos de solo (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).

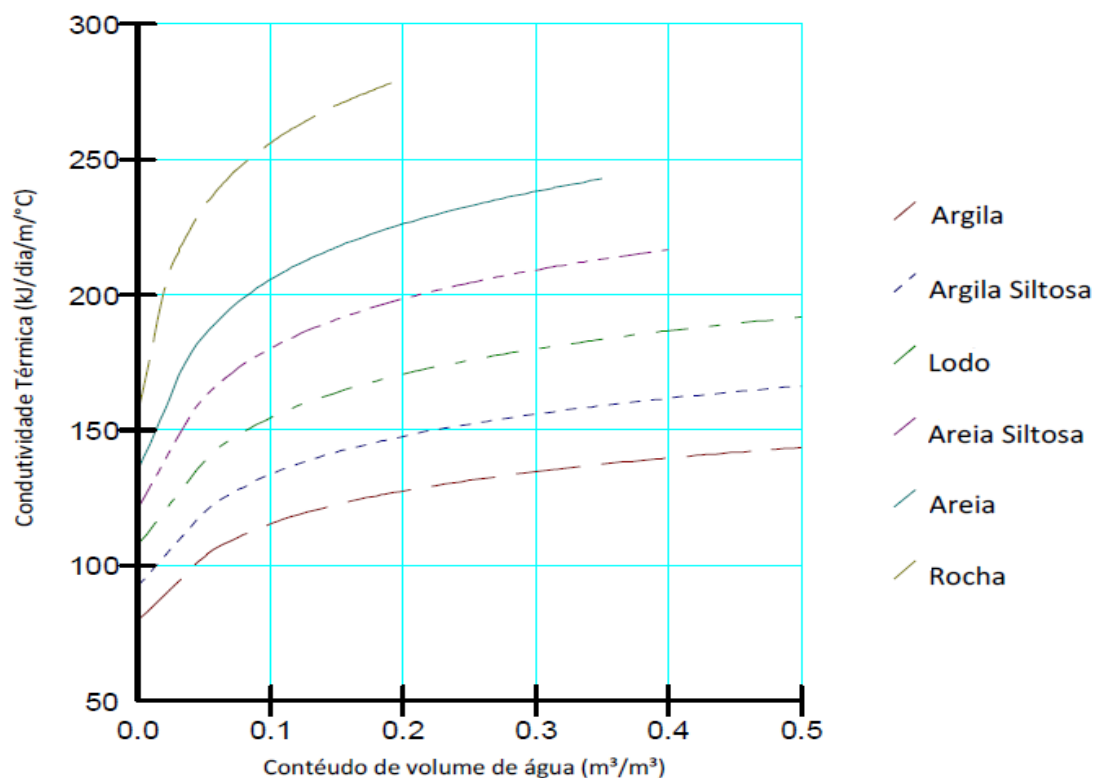


Figura 13- Valores caraterísticos da condutividade térmica em função do volume de água da amostra de solo para alguns tipos de solo (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).

3.3.3- Capacidade térmica volumétrica

Segundo (GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012) a capacidade térmica de um material é definida como a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de um determinado material em um grau unitário. Esta quantidade de calor é também conhecida como capacidade de calor específico quando expressa numa base de peso unitário, e finalmente, como capacidade térmica volumétrica quando expressa numa base de volume unitário. As unidades usadas no sistema são $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$ ou $Btu/(ft^3 \cdot F)$.

Na Figura 14, podem ser encontrados alguns valores da capacidade térmica volumétrica de um solo, em função do volume de água, para alguns materiais. No Anexo II- Capacidade Térmica Volumétrica de alguns materiais do presente documento, também

se podem encontrar mais valores tabelados, relativos à capacidade térmica volumétrica de outros materiais.

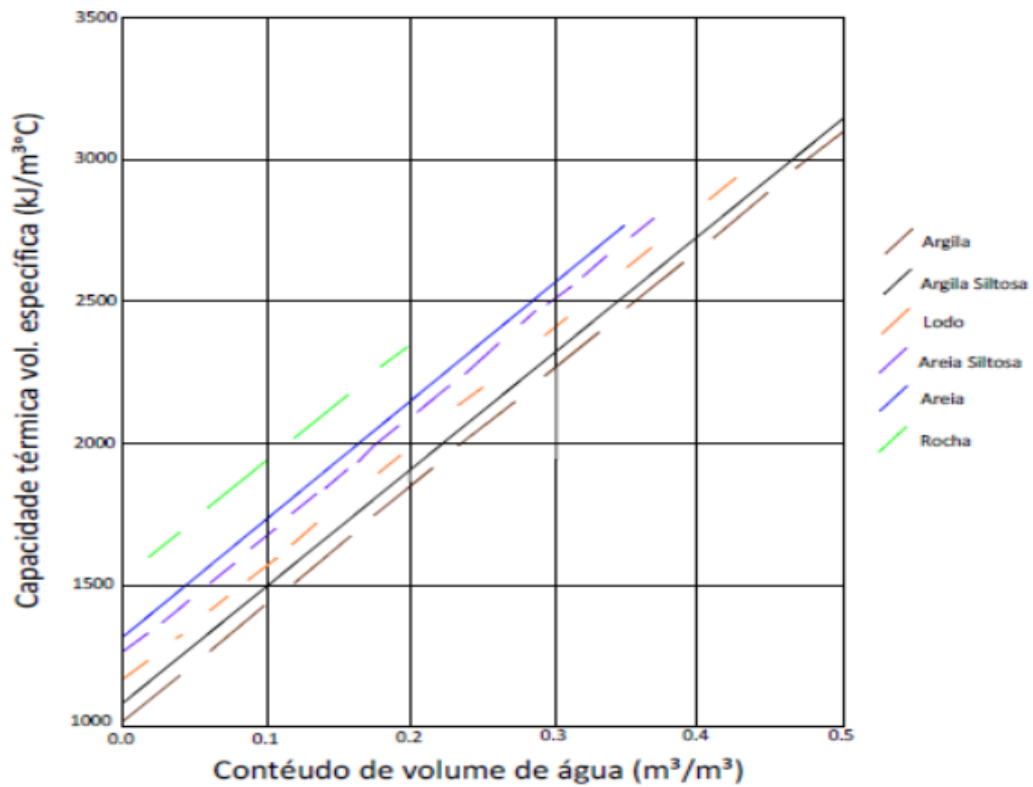


Figura 14- Valores característicos da capacidade térmica volumétrica em função do conteúdo de volume de água numa amostra (adaptado de: (GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).

3.3.4- Conteúdo volumétrico de água no solo

O valor do conteúdo volumétrico de água num solo tem que ser especificado nas propriedades do material para que o software realize uma análise térmica correta do mesmo. Este valor afeta o intervalo de tempo necessário para que todo o solo congele, ou seja, uma maior quantidade de água existente num solo faz com que, ao dar-se início ao congelamento, a temperatura oscile durante um intervalo de tempo superior até que o solo efetivamente congele. Este intervalo de tempo está diretamente relacionado com o calor latente libertado, ou seja, quanto maior a quantidade de água existente no solo,

mais tempo leva a que esta congele na sua totalidade, logo o intervalo de tempo do congelamento do solo aumenta (GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).

4- ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM SOLOS CONGELADOS

Neste capítulo serão expostos alguns ensaios que são executados em solos congelados, ensaios esses que analisam os parâmetros característicos dos solos. Com esta análise pretende-se ter uma melhor percepção da alteração dos parâmetros característicos dos solos, quando sujeitos a temperaturas negativas.

4.1- Ensaio Triaxial

O ensaio triaxial é o ensaio mais utilizado para caracterizar a resistência ao corte de um solo. Neste ensaio utiliza-se uma amostra de solo cilíndrica que se coloca dentro de uma câmara cheia de água. A amostra é isolada por uma membrana impermeável à água e são colocadas duas pedras porosas no topo e base da mesma. A pressão da água pode ser estabelecida através de uma ligação a um compressor. Por sua vez, o topo da amostra é carregado por meio de um êmbolo ligado a uma prensa, sendo medida a força por ele aplicada por meio de um anel dinamométrico como mostram a Figura 15 e Figura 16 (FERNANDES, 1994).

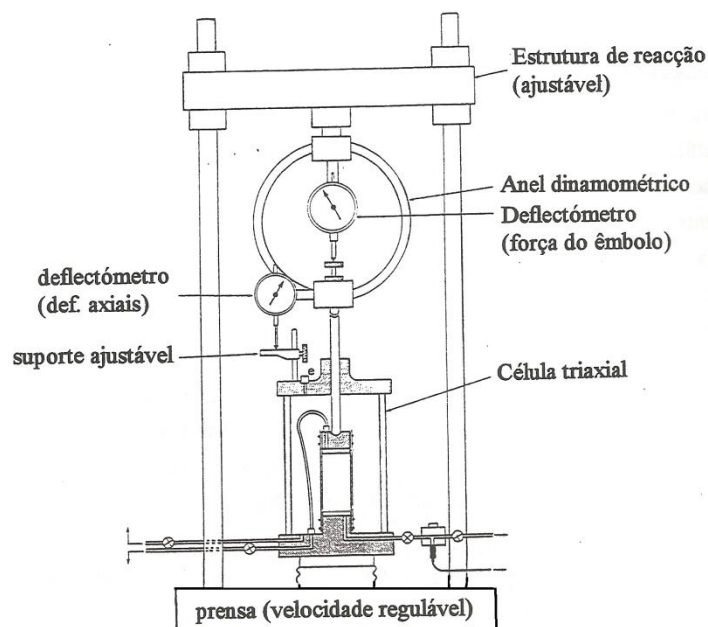


Figura 15- Equipamento para realização do ensaio triaxial (FERNANDES, 1994).

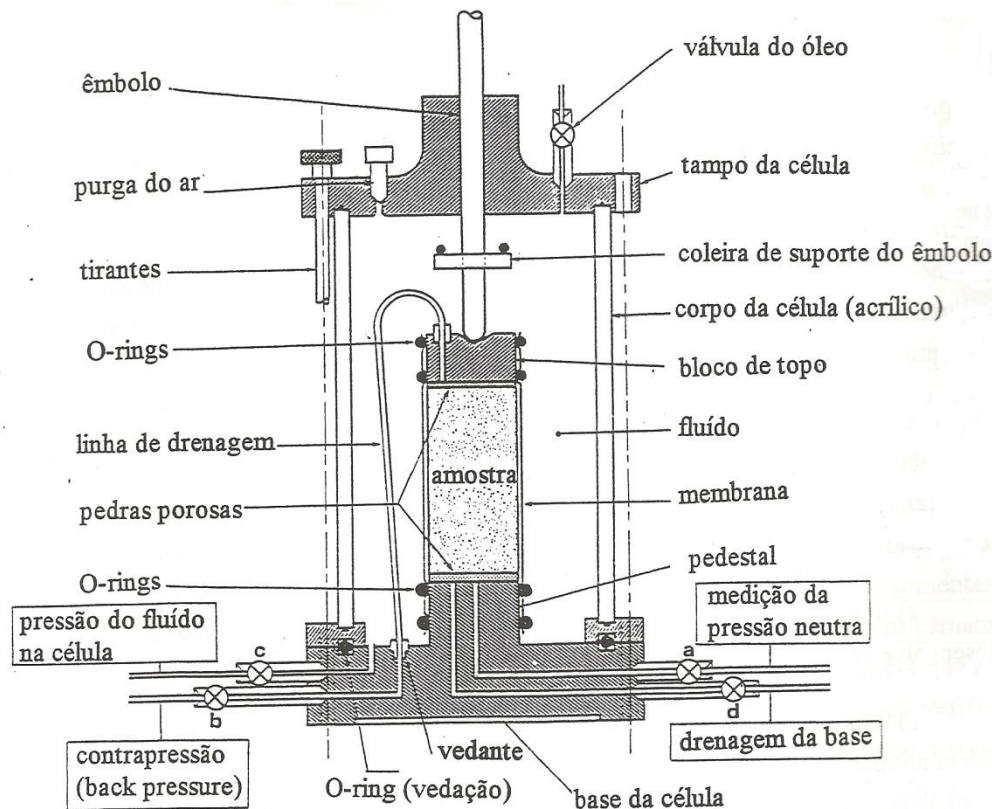


Figura 16- Pormenor do equipamento para realização do ensaio triaxial (FERNANDES, 1994).

As modalidades de ensaios mais frequentes são:

- ✓ Ensaio não consolidado não drenado (UU);
- ✓ Ensaio consolidado não drenado (CU);
- ✓ Ensaio consolidado drenado (CD).

No ensaio triaxial mede-se a força vertical aplicada, a pressão da água na câmara, a variação de volume de água na câmara (por via indireta calcula-se a variação do volume no provete de solo), o deslocamento vertical no topo do provete e a pressão da água intersticial no solo. Com estas medições pode-se avaliar corretamente a resistência do solo.

4.1.1- High-Pressure Low-Temperature (HPLT) Triaxial Test Cell

Este equipamento foi projetado para analisar solos quer para altas pressões, quer para baixas temperaturas. O equipamento suporta temperaturas até aos -65°C e pressões de confinamento até aos 500MPa. A Figura 17 apresenta um esquema da câmara de ensaio bem como do material que incorpora a célula de teste HPLT.

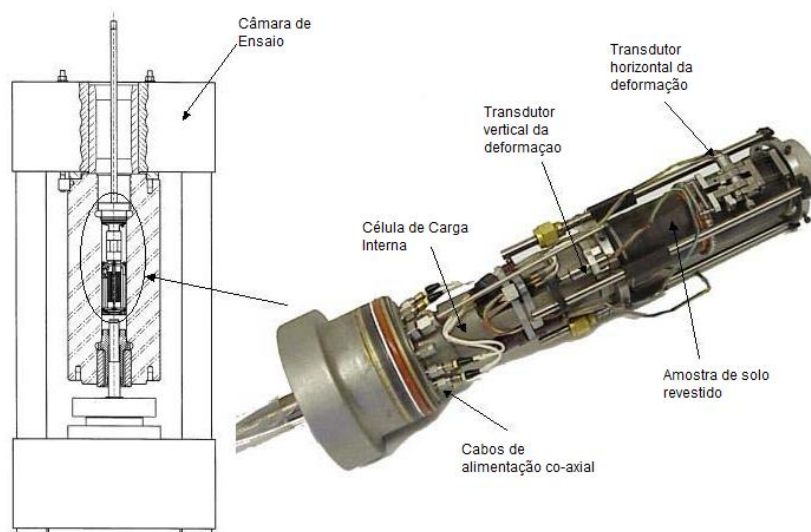


Figura 17- Esquema da câmara de teste e do material que incorpora a o equipamento HPLT (adaptado de: MOO Y. LEE, 2002).

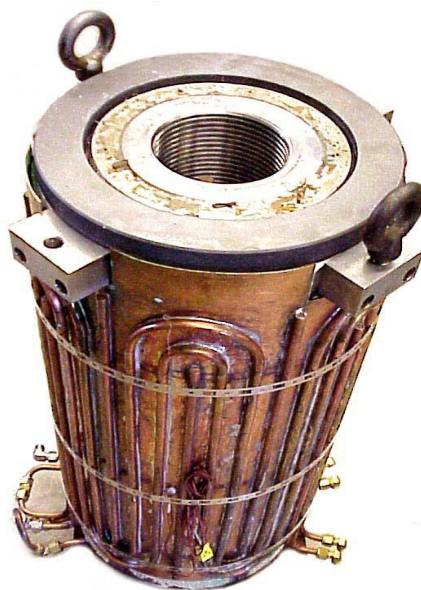


Figura 18- Equipamento de refrigeração externo incorporado no equipamento HPLT (MOO Y. LEE, 2002).

4.2- Ensaio de fluxo de permeabilidade ao ar

Este ensaio permite obter medidas de condutividade hidráulica para solos antes e após o congelamento dos mesmos. Para se efetuar o ensaio corretamente, este realiza-se numa câmara a baixa temperatura. O ensaio realiza-se no topo, centro e base do provete. O equipamento é constituído por uma válvula no topo, uma cápsula vedada onde a amostra de solo se coloca e um tubo de plástico transparente graduado que serve de reservatório de ar comprimido (Figura 19). Na execução do ensaio, a amostra de solo liga-se ao tubo de plástico transparente usando um encaixe plástico. A amostra do solo é colocada numa cápsula selada e a parte inferior do tubo de plástico é submersa num recipiente de água a 4°C. Quando a válvula está aberta, o ar flui pela amostra de solo e a água sobe fazendo deslocar o ar aprisionado na parte inferior. Efetua-se uma leitura do volume de ar no interior do tubo plástico graduado antes de se abrir a válvula e após a sua abertura em função do tempo durante o qual esta se encontra aberta mede-se a variação de volume de ar na fita graduada (AL-HOURI, 2008).

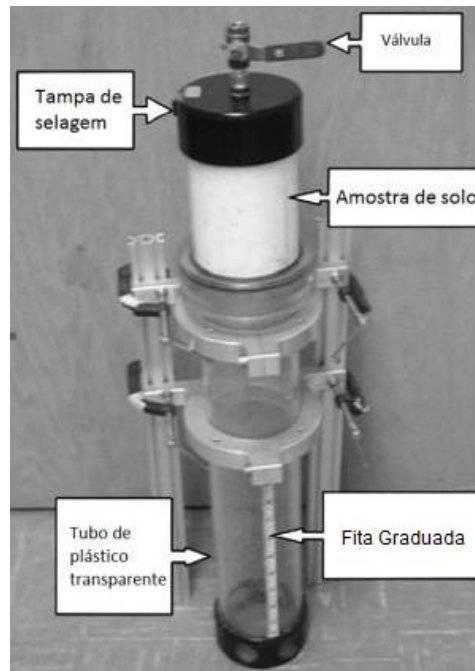


Figura 19- Equipamento para ensaiar o fluxo de permeabilidade ao ar (adaptado de: AL-HOURI, 2008).

4.3- Ensaio Pressiométrico

Seguidamente, de uma forma resumida apresenta-se o ensaio pressiométrico, pelo facto de ser um dos ensaios "*in situ*" com maior potencial de utilização na caracterização de solos congelados.

O pressiómetro foi desenvolvido em França em meados dos anos 50 pelo engenheiro francês Luís Ménard.

O seu princípio de utilização é baseado na utilização de um elemento de forma cilíndrica projetado para aplicar uma pressão uniforme nas paredes de um furo de sondagem, através de uma membrana flexível, promovendo assim a consequente expansão de uma cavidade cilíndrica na massa de solo. Atualmente, o equipamento é reconhecido como ferramenta rotineira de investigação geotécnica, sendo particularmente útil na determinação do comportamento tensão-deformação de solos "*in situ*".

A interpretação dos resultados é baseada nos conceitos de expansão de uma cavidade cilíndrica, possibilitando a estimativa de parâmetros que caracterizam o solo.

Os equipamentos atuais permitem a realização de ensaios em materiais que vão desde os solos lodosos até às rochas brandas ou mesmo rochas sãs.

O campo de aplicação deste ensaio engloba assim vários tipos de solo através de correlações semi-empíricas a partir dos parâmetros do ensaio, dele podem então obter-se parâmetros geotécnicos relacionados com a resistência e deformabilidade (VIEIRA, 2009).

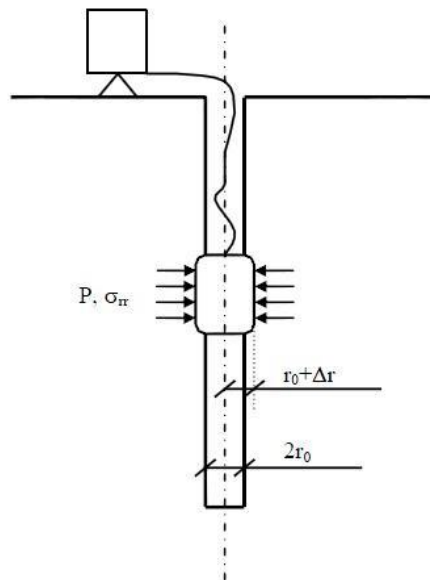


Figura 20- Esquema geral de um pressiómetro (SILVA, 2001).

Segundo SILVA (2001), existem diferentes tipos de pressiómetros no mercado, que diferem entre si pelo modo de introdução da sonda no solo. Podemos distinguir os diferentes pressiómetros nas seguintes categorias:

- ✓ Com pré - furação (PBPM - Preboring Pressuremeter);
- ✓ Com auto - perfuração (SBPM - Selfboring Pressuremeter);
- ✓ Com cone, cravado no local (DCPM - Driven Cone Pressuremeter);
- ✓ Com cone, penetração por pressão (PCPM - Pushed Cone Pressuremeter);
- ✓ Com tubo exterior de revestimento, penetração por pressão (PSPM - Pushed Shelby Tube Pressuremeter).

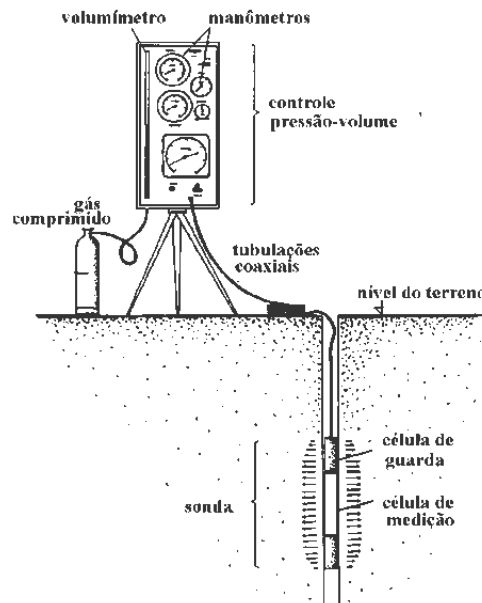


Figura 21- Ilustração dos elementos constituintes do pressiómetro de Ménard (SCHNAID, 2000).

4.3.1- Execução do ensaio

O ensaio com o pressiómetro de Ménard (PMT) é essencialmente um ensaio de carga “*in situ*”, efetuado no terreno, realizado após furação prévia. Como foi referido anteriormente, este ensaio é analisado mediante conceitos da expansão de uma cavidade cilíndrica de comprimento infinito no interior do solo. É necessária uma completa percepção do modo de funcionamento do equipamento para o executar corretamente.

O ensaio pressiométrico deve ser executado de acordo com a norma americana ASTM D 4719/87 ou a norma francesa NF P94-110/91, que indicam o modo de obter parâmetros de resistência e deformabilidade do solo nomeadamente: módulo Pressiométrico, E_P , pressão de fluência, P_F , e pressão Limite, P_L .

O ensaio consiste na colocação da sonda dentro de um furo de sondagem na cota desejada com o objetivo de a expandir mediante a aplicação de incrementos de pressão de mesma magnitude. Com estes resultados é possível traçar uma curva pressiométrica a partir da qual se procede ao cálculo dos diversos parâmetros de ensaio (VIEIRA, 2009).

Segundo a norma ASTM D 4719/87, o furo de sondagem é feito de forma a não perturbar o maciço e os métodos de furação são selecionados em função do tipo de solo. São aplicados na sonda incrementos de pressão, que são mantidos constantes por um intervalo de tempo normalmente de um minuto, durante o qual são registadas as leituras da variação de volume aos 15, 30 e 60 segundos. Num ensaio convencional são usados aproximadamente 8 a 14 incrementos de pressão onde no último escalão deve ser atingida a pressão limite, P_L (VIEIRA, 2009).

4.3.2- Perturbações na realização do ensaio

Para realizar um ensaio de qualidade, o modo como se faz o furo onde a sonda irá ser inserida influencia os resultados.

A preparação de um furo de qualidade é o fator mais importante para obtenção de um ensaio satisfatório. Segundo BRIAUD (1992), duas condições são necessárias para obter um furo de qualidade:

- ✓ Diâmetro do furo deve satisfazer a tolerância:

$$1,03 D_{\text{Sonda}} < D_{\text{Furo}} < 1,20 D_{\text{Sonda}}$$

- ✓ O equipamento e método utilizados para a sua preparação devem causar a menor perturbação possível.

É importante referir que os equipamentos e métodos de perfuração deverão ser utilizados em função dos tipos de solo, de maneira a minimizar e evitar perturbações.

O ensaio deve ser realizado imediatamente após a execução do furo, para evitar o risco de alteração das características do maciço por expansão.

Segundo a norma ASTM D 4719/87, é muito importante garantir que o diâmetro da sonda fique perto do diâmetro do furo porque, caso contrário, o ensaio poderia terminar sem alcançar a expansão suficiente da membrana no furo para permitir avaliar a pressão limite (FONTAINE, 2004).

4.3.3- Calibrações

O pressiómetro, qualquer que seja o modo de inserção da sonda no terreno, é um ensaio que necessita de um rigoroso controlo de execução e de cuidadosos procedimentos de calibração, tendo em conta os fatores que podem influenciar as medidas e assim obter resultados incorretos.

4.3.4- Determinação de parâmetros mecânicos

Os dados brutos obtidos dos ensaios pressiométricos precisam de correção devido às perdas de volume e pressão, isto é, devido à expansão das tubulações e compressibilidade da própria sonda e à rigidez da membrana respetivamente.

4.3.4.1- Retificação da leitura de pressão

Para além das calibrações que se têm que efetuar, sempre que se executa um ensaio a determinada profundidade, as leituras de pressões devem ser acrescidas da carga devida ao peso da coluna de água compreendida entre a superfície livre do reservatório de água e o ponto médio da sonda pressiométrica, como indica a Figura 22 (VIEIRA, 2009).

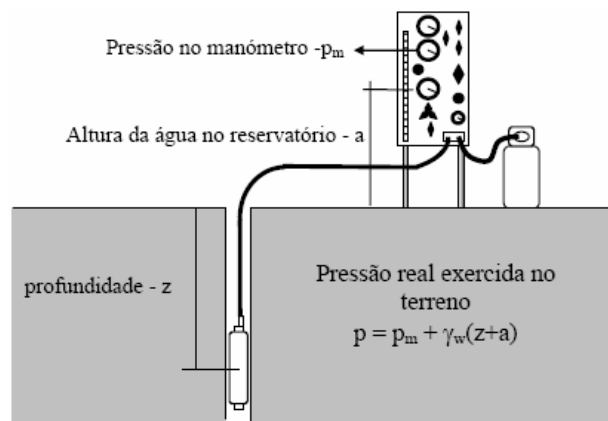


Figura 22- Correção da altura piezométrica (VIEIRA, 2009).

A pressão real da sonda vem:

$$P = P_m + P_i - P_c \quad (4.1)$$

Onde:

P - Pressão real aplicada no solo;

P_m - Pressão lida no manómetro da unidade de controlo;

P_i - Pressão Hidrostática;

P_c - Pressão obtida aquando da calibração por perda de pressão (pressão de retenção da membrana).

A pressão hidrostática P_i é dada por:

$$P_i = \gamma_w(Z + a)\rho_w \quad (4.2)$$

Onde:

γ_w - Peso volúmico da água ($9,81 \text{ kN/m}^3$);

ρ_w - Densidade da água (1);

Z - Distância do ponto médio da sonda ate ao solo;

a - Altura de água no pressiometro.

4.3.4.2- Retificação da leitura de volume

O volume corrigido é dado por:

$$V = V_m - V_c \quad (4.3)$$

Onde:

V - Volume real corrigido;

V_m - Volume lido na unidade de controlo;

V_c - Volume determinado aquando da calibração da sonda (compressibilidade da mesma).

4.3.4.3- Representação da curva característica

Utilizando o valor da pressão corrigida, P , e do volume corrigido, V , é possível construir um gráfico com uma curva $P - V$ (Figura 23). Através desta curva podemos deduzir os parâmetros mecânicos, característicos nos solos congelados, P_0, P_f e P_L sendo P_0 a pressão inicial no solo congelado, P_f a pressão crítica plástica (pressão de fluência) e P_L a pressão limite.

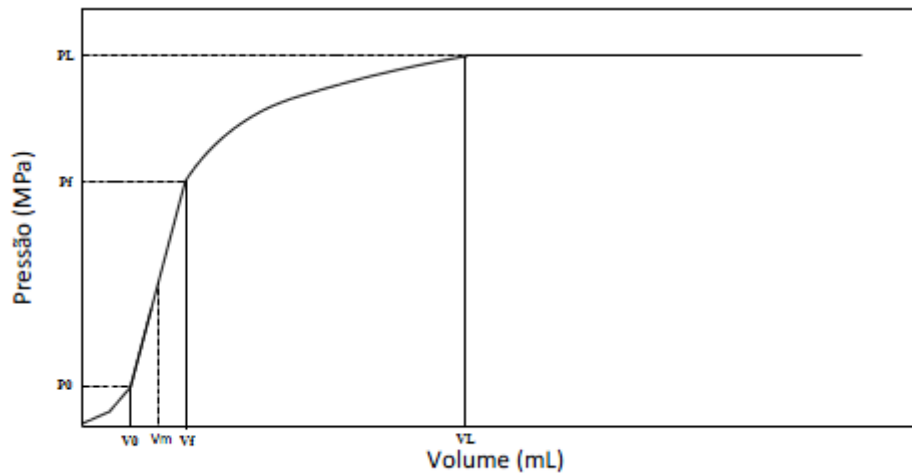


Figura 23-Curva típica de um ensaio pressiométrico (adaptado de: YU et al., 2002).

A curva típica de teste é constituída por três partes: a primeira fase corresponde ao início do ensaio, quando a sonda começa a pressionar as paredes do furo, restabelecendo as condições de repouso do solo, iniciando a sua expansão, é a fase inicial pressurizada, cuja inclinação é gradual, a qual é menor do que a fase elástica similar, com uma inclinação de curva abrupta. A última é a fase plástica, onde o solo começa a ceder e a falhar gradualmente (YU et al., 2002).

4.3.4.4- Determinação do Módulo Pressiométrico de Menard e do Módulo de Elasticidade

De acordo com a teoria da elasticidade e da equação de expansão radial de Lamé, existem três equações importantes:

$$G = V_1 \times \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (4.4)$$

$$G = \frac{E_p}{2(1+\nu)} \quad (4.5)$$

$$V_1 = V_s + V_m \quad (4.6)$$

e

$$V_m = \frac{V_0 + V_f}{2} \quad (4.7)$$

Através das equações anteriores, podemos obter facilmente a equação para o cálculo do módulo do pressiómetro, dada pela expressão seguinte:

$$E_p = 2(1 + \nu) \times (V_s + V_m) \times \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (4.8)$$

Onde:

ΔP - variação de pressão na fase entre P_0 e P_f ;

ΔV - variação de volume na fase entre V_0 e V_f ;

V_s - volume inicial da sonda;

V_m - volume médio no troço entre V_0 e V_f ;

ν - coeficiente de poisson;

G - módulo de rigidez.

O módulo de elasticidade é calculado através da expressão:

$$E = \frac{E_p}{\alpha_p} \quad (4.9)$$

Onde:

E - módulo de elasticidade

E_p - módulo pressiométrico

α_p - parâmetro determinado na Tabela 1.

Tabela 1- Determinação do parâmetro α_p , factores reológicos para vários tipos de solos (VIEIRA, 2009).

Tipo de Solo	Descrição	E_p/P_L	α_p
Turfas	-	-	1
Argilas	Pré-Consolidadas	>16	1
	Normalmente Consolidadas	9-16	0,67
	Consolidadas	7-9	0,5
Siltes	Pré-Consolidadas	>14	0,67
	Normalmente Consolidadas	8-14	0,5
Areias	-	>12	0,5
	-	7-12	0,33
Areias e Pedregulhos	-	>10	0,33
	-	6-10	0,25
Rochas	Muito Fracturadas	-	0,33
	Sãs ou intactas	-	0,5
	Alteradas	-	0,67

4.4- Ensaio CBR (California Bearing Ratio)

Este ensaio foi concebido pelo Departamento de Estradas de Rodagem da Califórnia (USA) para avaliar a resistência dos solos.

No ensaio CBR, é medida a resistência à penetração de uma amostra saturada compactada segundo o método Proctor. Este ensaio encontra-se normalizado, podendo destacar a norma americana ASTM D1883-07 - “Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils” e as especificações impostas em LNEC E-198 – “Índice Californiano CBR”.

Segundo HAZIRBABA et al. (2010), o ensaio CBR pode realizar-se em provetes de solo congelado, para tal, estes são colocados numa câmara congeladora, que possui moldes incorporados onde colocar a nossa amostra de solo (Figura 24), moldes esses devidamente isolados com fibra de vidro, e de seguida procede-se à realização do ensaio. Através de uma análise dos resultados obtidos, podemos retirar informações sobre a resistência ao corte de um solo congelado, bem como correlacionar a sua resistência com a temperatura.

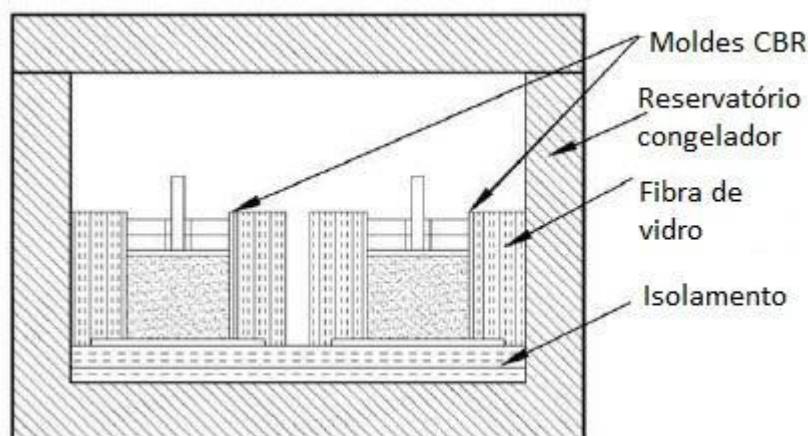


Figura 24- Equipamento para ensaio CBR em provetes de solo congelados (adaptado de: HAZIRBABA et al., 2010).

4.5- Ensaio de Pré-Consolidação

É de conhecimento geral que qualquer material sujeito a uma determinada solicitação se deforma no sentido de suportar essa solicitação. Isto é, nenhum material pode suportar uma solicitação sem se deformar, sendo o valor dessa deformação dependente do tipo de solicitação e do tipo de material em questão.

Segundo QI et al. (2010), para solos convencionais à temperatura ambiente, o valor da pressão de pré-consolidação representará um historial da carga que nele atuou e, para prever o comportamento do solo quando sujeito a novos carregamentos, tem ainda uma relação de proximidade com as propriedades mecânicas do mesmo. Da mesma forma, para solos congelados poderá existir pressão de pré-consolidação, valor esse que assume extrema importância para serem conhecidas as propriedades mecânicas destes, onde os cristais de gelo e os grãos de solo podem formar estruturas especiais.

A temperatura é um dos fatores que mais influência tem na mecânica dos solos, verificando-se que a pressão de pré-consolidação depende muito desta, aumentando com a diminuição da temperatura e vice-versa. No que diz respeito a solos congelados, encontram-se muito poucos estudos referentes ao assunto.

Para medir este valor característico dos solos, utiliza-se um aparelho de carregamento denominado de equipamento edométrico para solos congelados (Figura 25). Este equipamento está dividido em três partes distintas: o sistema de controlo, o sistema de

carregamento e o sistema térmico. O sistema de controlo baseia-se num sistema para recolher dados e controlar quer a carga, quer a temperatura a aplicar. O sistema de carregamento consiste no sistema que aplica as cargas na amostra de solo através de uma bomba servo-elétrica. Finalmente, o sistema térmico permite ajustar a temperatura da tampa superior, inferior e do ambiente envolvente, para que a amostra de solo esteja termicamente uniforme.

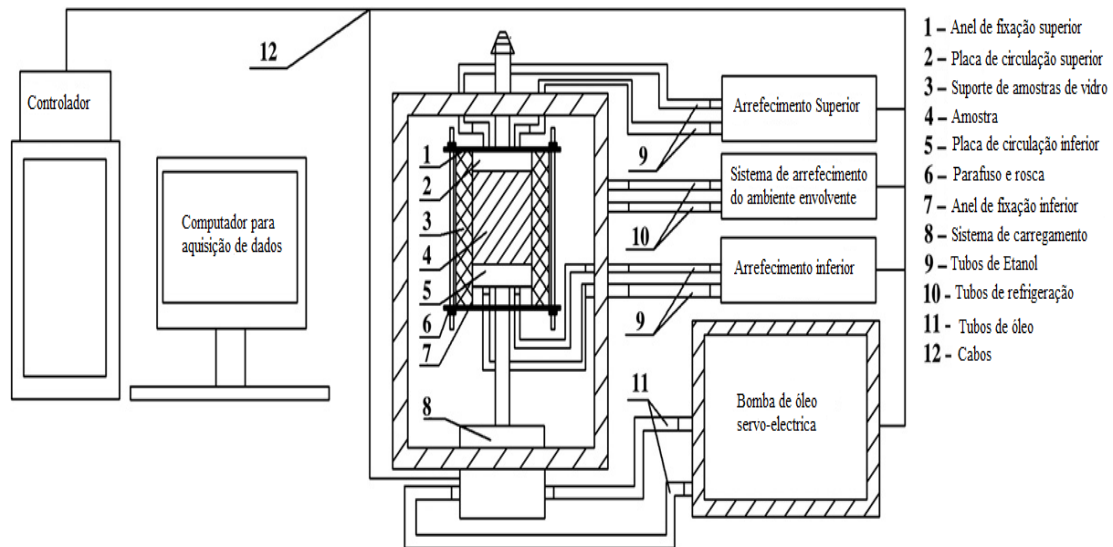


Figura 25- Equipamento para ensaio de pré-consolidação (adaptado de: QI et al., 2010).

4.6- Ensaio com o Dilatómetro de Marchetti

O ensaio com o Dilatómetro de Marchetti (DMT) foi desenvolvido em Itália pelo engenheiro Silvano Marchetti, Professor na Universidade LÁquila, em Roma. Marchetti idealizou um equipamento de fácil manuseamento e bastante económico, onde as perturbações produzidas fossem inferiores às observadas noutros ensaios de penetração.

Este equipamento ganhou destaque e reconhecimento internacional, estando atualmente padronizado e em uso em 40 países, permitindo desta forma uma partilha direta das experiencias obtidas.

A normalização do ensaio segue as normas ASTM "Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer Test" - D6635-01 e o Eurocode 7 - Geotechnical

Design - Part 3 - "Design assisted by field testing" - Section 9 - "Flat Dilatometer Test (DMT), em uso nos Estados Unidos e na Europa respetivamente.

O princípio de funcionamento do DMT consiste em aplicar ao solo um conjunto de pressões, através de uma membrana metálica de 6,0cm de diâmetro, instalada na face lateral de uma lâmina extremamente fina, produzida em aço inoxidável, de altíssima resistência (GEOTÉCNICA).

O ensaio compreende a aplicação de uma pressão na membrana, através da introdução de um gás (ar comprimido ou nitrogénio), de maneira a provocar a expansão da membrana contra o terreno, atingindo um valor máximo de deslocamento de 1,10 mm do seu centro. As pressões são medidas para deslocamentos de 0,05 (leitura A) e 1,10mm (Leitura B), por meio de um par de manômetros, de alta precisão, disponíveis na central de leituras do equipamento, instalada na superfície do terreno. Uma terceira (Leitura C), relacionada com a pressão hidrostática, e realizada na fase de descarga quando a membrana atinge a posição correspondente à leitura A (GEOCIÊNCIAS).

O gás de expansão encontra-se disponível à superfície, numa garrafa blindada, de alta pressão, com limite superior até 80 Kgf/cm², controlado através de uma válvula reguladora de pressão.

Um fio elétrico liga a membrana instalada na lâmina do DMT à unidade de controlo, situada na superfície do terreno, permitindo a monitoração da expansão da membrana contra o solo.

Aplicar uma pressão e medir a correspondente deformação ocorrida no solo, equivale a obter informações relativas ao comportamento “tensão Vs deformação” do solo, aspeto que está associado aos parâmetros fundamentais de resistência, deformabilidade, granulometria e histórico de tensões.

Essas observações do comportamento do solo, relativas às pressões “inicial” (pseudo repouso do terreno, no momento do início da expansão da membrana), “final” (expansão completa da membrana, contra o terreno) e de "descarga" permitem as determinações dos índices dilatométricos e também as avaliações de numerosos parâmetros geotécnicos (GEOTÉCNICA).



Figura 26- Equipamento utilizado num ensaio com o Dilatómetro de Marchetti (GEOCIÊNCIAS).

5- PROPRIEDADES DOS SOLOS CONGELADOS

Geralmente, os solos congelados são constituídos por 4 partes, sendo elas:

- ✓ esqueleto sólido;
- ✓ cristais de gelo;
- ✓ gases;
- ✓ água não congelada.

Todos estes constituintes dependem de diversos fatores sendo, assim, bastante complexo prever qual o comportamento mecânico exato de um solo congelado. A temperatura, a granulometria do solo, a quantidade de água não congelada e a concentração de sais existentes na água são alguns dos aspetos que devem ser considerados quando se analisa a resposta mecânica de um solo deste tipo (ARENSEN et al., 2004).

Também NGUYEN et al. (2010) mostra que a resistência de um solo congelado vai variando à medida que outros parâmetros variam, são eles a temperatura, o teor de sal e a quantidade de água não congelada ao longo do processo de congelamento.

A investigação sobre as propriedades físicas dos solos congelados começou no século XIX e dois acontecimentos foram os impulsionadores para essa investigação. A revolução industrial, que se expandiu para áreas mais remotas do hemisfério Norte, e o solo congelado que foi introduzido como um dos métodos para a construção de estruturas de apoio utilizadas quer em minas, quer em engenharia geotécnica (ARENSEN et al., 2007).

O presente capítulo pretende resumir quais os efeitos de diversos parâmetros no que respeita ao comportamento de um solo congelado. Alguns desses parâmetros, e qual a influência que têm na resistência de um solo congelado, estão apresentados na Tabela 2.

5.1- Processo de congelamento

O texto a seguir apresentado, é baseado em BING et al. (2011). A formação de gelo no interior de um solo envolve um arrefecimento no sistema formado pelo solo e pela água existente nele como mostra a Figura 27. Assim que a água começa a arrefecer e se

aproxima da sua temperatura de congelamento, começam a surgir cristais de gelo, sendo que este processo ocorre a temperaturas alguns graus abaixo de zero. Por outras palavras, é necessário um super arrefecimento para que o processo de congelamento tenha início. A água não começa a congelar até que a temperatura do sistema não baixe até à temperatura de nucleação espontânea, T_{ns} . Neste ponto, o sistema encontra-se a uma temperatura inferior à necessária para que o congelamento continue. A mudança abrupta sofrida pela água, quando se dá a sua transformação de água líquida para gelo, faz com que as moléculas de água se agreguem às partículas do solo. Assim, liberta-se calor latente durante a formação dos cristais de gelo, fazendo aumentar a temperatura do sistema novamente até à temperatura de congelamento da água pura, T_f . Neste ponto a temperatura estabiliza durante um intervalo de tempo. Durante o processo de congelamento, a extração de calor latente leva ao sucessivo congelamento da água não congelada restante. O processo de congelamento de um solo passa então por 4 fases que são:

- ✓ Nucleação espontânea;
- ✓ Mudança abrupta da temperatura assim que se inicia a formação de cristais de gelo;
- ✓ Fase de equilíbrio durante um intervalo de tempo a temperatura constante;
- ✓ Fase de diminuição gradual da temperatura.

Toda a água livre existente nos poros do solo, assim como a fina camada existente em torno das partículas do mesmo congela praticamente na sua totalidade a uma temperatura próxima dos -70°C , t_c . Em solos de granulometria fina, em que a área específica de contato das partículas é muito grande, uma quantidade de água não congelada pode existir mesmo a temperaturas mais baixas (BING et al., 2011).

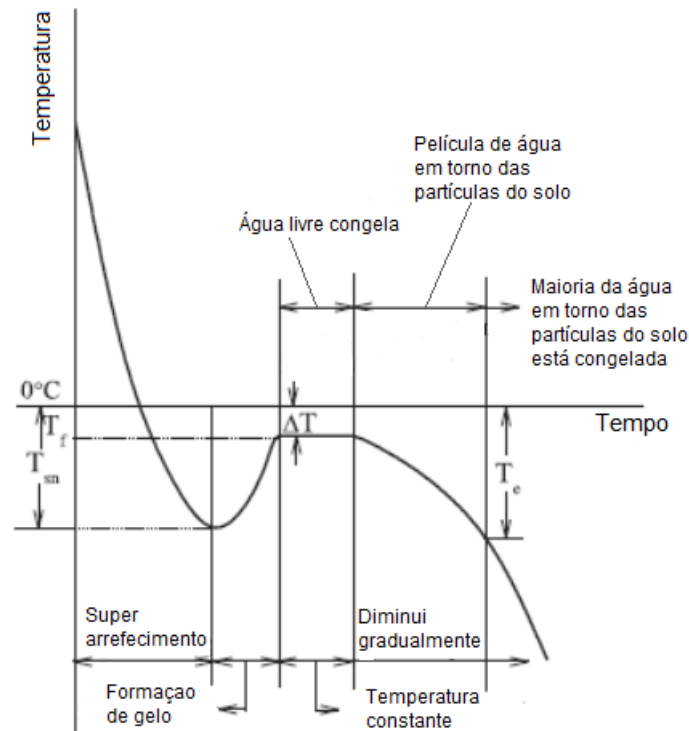


Figura 27- Gráfico com a curva representativa de um sistema de congelamento
(adaptado de: BING et al., 2011).

5.2- Teor de água e salinidade

Sobre condições normais, a temperatura de congelamento da água pura situa-se nos 0°C, e ocorre na interface do gelo/água até que a formação de gelo termine.

Para um solo, a sua temperatura de congelamento é dependente do seu teor de água, teor de sais e das cargas impostas nele.

Conhecer a temperatura de congelamento de um solo revela-se extremamente importante em processos de construção tais como no projeto de contenções provisórias impermeáveis, assim como para controlar o fluxo de água subterrânea durante a fase de construção da obra.

A temperatura de congelamento de um solo diminui com o aumento do teor de sal e aumenta com o aumento do teor de água, independentemente do tipo de solo. No entanto, a influência do teor de sal no ponto de congelamento de um solo é superior ao efeito do teor da água. Para solos com granulometria fina, a temperatura de congelamento é inferior do que para solos com granulometria mais grossa, no entanto, o

efeito do tamanho das partículas do solo, na sua temperatura de congelamento diminui com o aumento do teor de água (BING et al., 2011).

Segundo NGUYEN et al. (2010), solos salinos apresentam uma resistência inferior quando comparados com solos não salinos.

A velocidade do congelamento diminui consideravelmente em solos salinos, ou seja, quanto maior for o teor de sal num solo, mais lento se torna o processo de congelamento, e existe um aumento da quantidade de água não congelada (ARENSON et al., 2004).

5.3- Volume de água não congelada

O volume de água não congelada desempenha um papel muito importante relativamente à resistência de um solo congelado. Dependendo do teor de sal, temperatura, dimensões das partículas sólidas do solo e pressão, a quantidade de água não congelada num solo pode ser significativa. Mesmo a temperaturas inferiores a 0°C, continua a existir água não congelada no solo sob a forma de uma camada sobre a superfície das partículas sólidas do solo ou como água livre nos poros. Quanto menores forem as partículas do solo, maior é o volume de água não congelada (ARENSON et al., 2007).

Segundo ARENSON et al. (2004), regiões do solo mais compactas, onde as partículas sólidas se encontram mais próximas, apresentam uma menor quantidade de água não congelada ao invés de regiões com um maior índice de vazios, onde a quantidade de água não congelada é bastante superior.

Estudos recentes mostram que uma estrutura de gelo é mais frágil em solos salinos e a localização da água não congelada depende do início do congelamento da amostra inicial (ARENSON et al., 2007).

5.4- Condutividade térmica

O processo de congelamento de um solo é bastante complexo, sendo a condutividade térmica dos materiais constituintes do solo, a fator que regula esse processo. Visto que a condutividade térmica do esqueleto sólido do solo apresenta um valor superior à condutividade térmica do gelo e também à da água pura, os cristais de gelo começam a formar-se nos locais onde o gradiente térmico for superior, ou seja, a partir das

partículas do solo. Existem dois processos relativamente ao avanço da frente de congelamento que são:

- ✓ avanço das baixas temperaturas de congelamento através do esqueleto do solo;
- ✓ avanço das baixas temperaturas de congelamento através dos cristais de gelo existentes nos poros do solo.

5.4.1- Mecanismo de congelamento das areias

Numa areia de granulometria grosseira, as baixas temperaturas avançam mais rapidamente através do esqueleto do solo, uma vez que a condutividade térmica das partículas sólidas é superior à da água e do gelo como já foi dito anteriormente. O gelo vai formar-se de acordo com os gradientes térmicos locais, ou seja, vai surgir a partir das partículas do solo. Alguma água poderá ficar retida no interior dos vazios do solo (Figura 28). Gradientes térmicos mais elevados fazem com que a quantidade de água não congelada retida nos vazios do solo seja maior que em casos onde o gradiente térmico é mais baixo, sendo portanto o arrefecimento das partículas feito de forma mais lenta e, por conseguinte, menos água não congelada ficará retida.

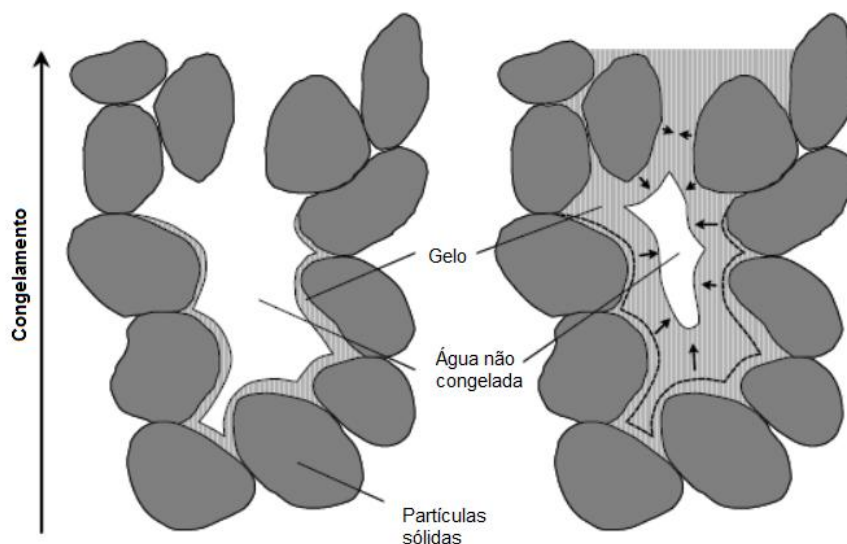


Figura 28- Mecanismo de congelamento de uma areia (adaptado de: ARENSON et al., 2004).

Em solos salinos, o congelamento não se realiza da mesma forma. Mesmo para teores de sal baixos, os cristais de gelo começam a "crescer" em forma de agulhas, que irão

empurrar a salmoura de alta concentração, para os lados. Como a condutividade térmica do gelo é superior à da salmoura, e a concentração de sal na ponta dos cristais de gelo é inferior á concentração no meio destes, o gelo continuará a crescer na ponta das agulhas, Figura 29, (ARENSEN et al., 2004).

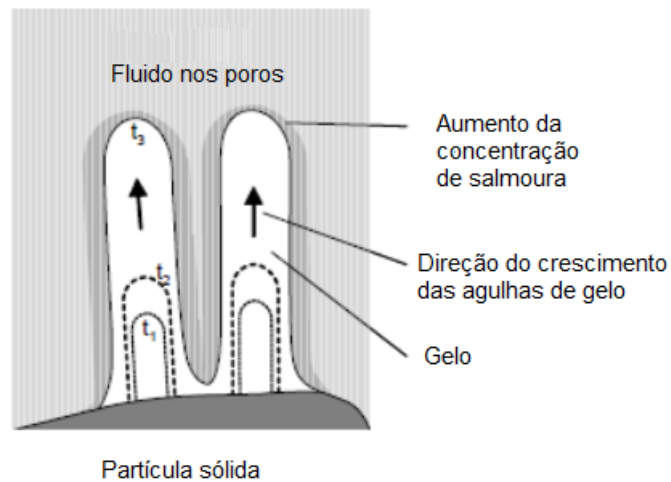


Figura 29- Mecanismo de congelamento em solos salinos (adaptado de: (ARENSEN et al., 2004).

Tabela 2- Efeito de diversas variáveis na resistência de um solo congelado (adaptado de: (ARENSON et al., 2007)).

Variável	Efeitos na resistência de um solo congelado
Temperatura	Geralmente a resistência aumenta com a diminuição da temperatura. Além disso, o comportamento tensão-deformação pode alterar o seu estado, de dúctil para frágil. Esta mudança deve-se principalmente à alteração no teor de água não congelada.
Taxa de deformação	Um aumento na taxa de deformação resulta num aumento da resistência e também numa mudança em relação ao comportamento frágil.
Teor de gelo	A resistência aumenta à medida que o conteúdo de gelo diminui. Isto acontece devido aos obstáculos estruturais existentes, como resultado da formação de partículas sólidas que entram em contato entre si.
Teor de ar	Apenas alguns testes sobre o efeito do conteúdo de ar na resistência de solos congelados estão disponíveis. Os resultados sugerem que o ar dentro das amostras anula qualquer tendência de ocorrência de dilatação, proporcionando uma oportunidade significativa para a eliminação de vazios de ar e da contração associada.
Tensão confinada	A tensão confinada tem um efeito menos significativo na resistência de um solo congelado, submetido a tensões inferiores às pressões de fusão. Quanto maior for a existência de partículas sólidas, maior será a resistência pronunciada, isto porque a componente de resistência, devido ao trabalho provocado pela dissipação de atrito, é função da tensão confinada.
Salinidade	A resistência de um solo salino congelado diminui com o aumento da salinidade. Isto deve-se ao facto do ponto de congelamento baixar, resultando num maior teor de água não congelada, a temperaturas semelhantes. Além disso, sabe-se que a estrutura dos cristais de gelo, num ambiente salino, é mais frágil, o que pode também ser uma causa para a diminuição da resistência de solos salinos, comparando com solos não salinos

6- ENSAIOS LABORATORIAIS

Este ponto visa apresentar todos os procedimentos a realizar a nível de ensaios laboratoriais, no que diz respeito a uma amostra de solo.

6.1- Descrição geral

A seguinte análise experimental prende-se fundamentalmente com o uso de uma areia marinha, uma vez que a exploração das areias marinhas para uso na construção civil é cada vez mais uma prática comum, em vários países do mundo, pretendendo-se com esta análise avaliar qual o efeito que diferentes teores de sal provocam no processo de congelamento, quer na variação volumétrica do mesmo, quer no registo das temperaturas de congelamento atingidas.

Uma vez que se tratam de areias marinhas, os sais presentes nas mesmas são exclusivamente provenientes da água do mar. Após a secagem, o sal restante, está localizado, somente, no exterior dos grãos. O sal tanto cristaliza na superfície do grão, como dentro de depressões dos grãos formando cristais facilmente observáveis ao microscópio.

Boutmin (1986) referido por CAVALCANTI (2007), definiu que o teor dos sais dos agregados será em função do teor em água de retenção das areias e da salinidade das águas residuais.

Como os sais associados às areias estão dissolvidos na água, é necessário definir os diferentes tipos de água, que segundo *Boutmin & Ottman* (1988), são a água de saturação e a água de retenção. A água de saturação é aquela que ocupa a totalidade dos espaços intergranulares.

Quando a areia marinha sofre um descarregamento hidráulico em terra, esta passa de um estado saturado para um estado escorrido, por eliminação da água de percolação, sendo a restante água chamada de água de retenção, a qual permanece fixa sob a forma de uma película na superfície dos grãos.

Segundo *Boutmin* (1986) citado por CAVALCANTI (2007), após 1 hora pode-se considerar que se tem uma areia escorrida, o teor em sal não evolui mais.

Após secagem da areia, quando a água de retenção é eliminada, por evaporação, o teor em sal da areia permanece constante sendo assim, o teor de sal residual de uma areia será em função do seu teor em água de retenção.

Segundo o mesmo autor, a salinidade da água do mar varia entre 3,5% e 3,7% (CAVALCANTI, 2007).

Na análise experimental, partiu-se de uma areia utilizada no trabalho de MARCOS (2011), com um teor de sal de 0g/Kg de areia seca, seguindo-se uma nova análise agora com um teor de sal de 1,5g/Kg areia seca e, finalmente, uma última análise com um teor de sal de 3,0g/kg areia seca, não ultrapassando, em qualquer um dos casos, o teor máximo de sais existentes numa areia que é de 4,2g/kg de areia seca.

Segundo (DEVELOPMENT), quanto maior for o teor de sal mais baixo será o seu ponto de congelamento. Na água doce o ponto de congelamento é de 0°C, enquanto na água salgada saturada com um teor de sal máximo de 23,3%, o ponto de congelamento será de -21,1°C.

Na análise experimental efetuada, admitiu-se que a temperatura de congelamento da areia é igual à da água salgada com uma salinidade média de 3,5%, ou seja, aproximadamente -2°C .

Tabela 3- Valores da temperatura de congelamento da água (°C) em função da salinidade da água (%) (adaptado de: DEVELOPMENT).

Salinidade (%)	0	1,0	2,47	3,00	3,50
Temperatura de Congelamento da água (°C)	0	-1,08	-1,33	-1,63	-1,91

6.2- Equipamento de Congelamento da Universidade de Aveiro

O equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro encontra-se no laboratório do Departamento de Engenharia Civil e é constituído por três reservatórios, assim como o sistema de arrefecimento que funciona a propilenoglicol, que por sua vez está ligado a um sistema de aquisição de dados, onde são registadas as temperaturas ao longo do tempo nas diferentes sondas. Todo este equipamento tem ainda um sistema de abastecimento de água ligado aos três reservatórios, com drenagem de água também incluída (Figura 30 e Figura 32).



Figura 30- Equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro



Figura 31 - Sistema de arrefecimento da Universidade de Aveiro

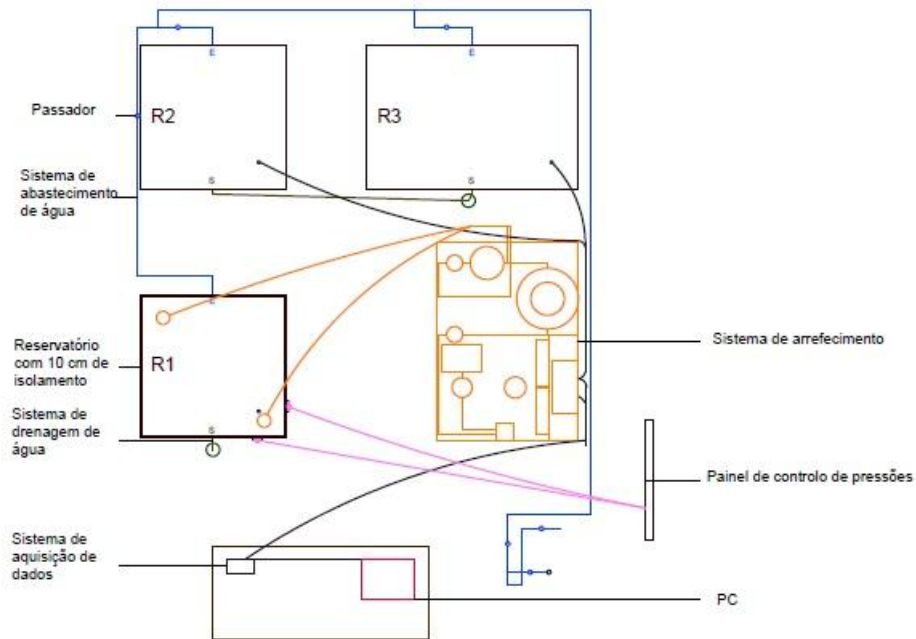


Figura 32 - Esquema do equipamento de congelamento da Universidade de Aveiro (BENTA et al., 2010)

Os tubos de congelamento são de aço inoxidável, com diâmetro exterior de 7cm e comprimento de 75cm (Figura 33).

As sondas que registam as temperaturas estão agrupadas duas a duas, sendo uma a sonda de cima e outra a sonda de fundo, estas mesmas sondas têm 10 e 59 cm respetivamente (Figura 34).



Figura 33 - Tubos de congelamento em aço inox



Figura 34 - Sonda de cima e sonda de fundo para registo de temperaturas

6.3- Características do solo a ensaiar

A areia utilizada nos ensaios laboratoriais é uma areia da zona das dunas da praia da Tocha, concelho de Cantanhede, distrito de Coimbra. São apresentadas de seguida as suas propriedades e características e os ensaios realizados para sua obtenção.

6.3.1- Analise Granulométrica

Para uma correta caracterização de um dado solo, é necessário determinar:

- ✓ A composição granulométrica;
- ✓ Os limites de consistência ou de Atterberg.

A composição granulométrica pode ser definida como a distribuição em percentagem ponderal (isto é, em percentagem do peso total) das partículas do solo de acordo com as suas dimensões. Para as partículas de maiores dimensões o método que se usa para a determinação da composição granulométrica é o da peneiração, enquanto para partículas de dimensões muito reduzidas, isto é, partículas que passam no peneiro 200 (cuja malha tem 0,074mm de lado segundo a NP EN 933-2), a distribuição granulométrica é em regra realizada por sedimentação.

A análise granulométrica efetuada à areia recolhida nas dunas da praia da Tocha, foi realizada de acordo com a norma NP EN 933-1 isto é, a norma que estipula o método de

análise dos agregados usando o método de peneiração, bem como a NP EN 933-2, ou seja, a norma onde são especificadas as dimensões nominais das aberturas e do formato da tela (de arame ou chapas perfuradas) dos peneiros.

O ensaio de peneiração consiste em fazer passar a nossa amostra de solo por um conjunto de peneiros ordenados por classes granulométricas de granulometria decrescente tal como mostra a Figura 35. Este ensaio realiza-se primeiro efetuando a lavagem da nossa amostra de solo e peneirá-la de forma a obter a separação completa e suspensão dos finos, seguida da peneiração a seco.

Os resultados estão apresentados na Tabela 5, enquanto que a Figura 36 representa a curva granulométrica da areia, traçada em função das percentagens retidas em cada peneiro do ensaio.



Figura 35- Agitador de peneiros (GRAVIMETA)

Tabela 4- Pesagens iniciais da areia

Massa seca total, M1	200,50	g
Recipiente vazio, rv	302,56	g
Massa seca após lavagem+rv, M2+rv	503,02	g
Massa seca após lavagem, M2	200,46	g
Massa seca dos finos removidos por lavagem, M1-M2	0,04	g

Tabela 5- Resultados do processo de peneiração para a análise granulométrica

Abertura (mm)	Mat.retido (g)	% Material Retido	% Cumulativa de Material Retido	% Cumulativa de Material Passado
8,000	0,00	0,00	0,00	100,00
4,000	0,15	0,07	0,07	99,93
2,000	0,12	0,06	0,13	99,87
1,000	0,60	0,30	0,43	99,57
0,500	13,42	6,69	7,12	92,88
0,250	154,58	77,01	84,13	15,87
0,125	31,23	15,56	99,69	0,31
0,063	0,62	0,31	100,00	0,00
Fundo	0,00	-	-	-
soma de controlo	200,72			

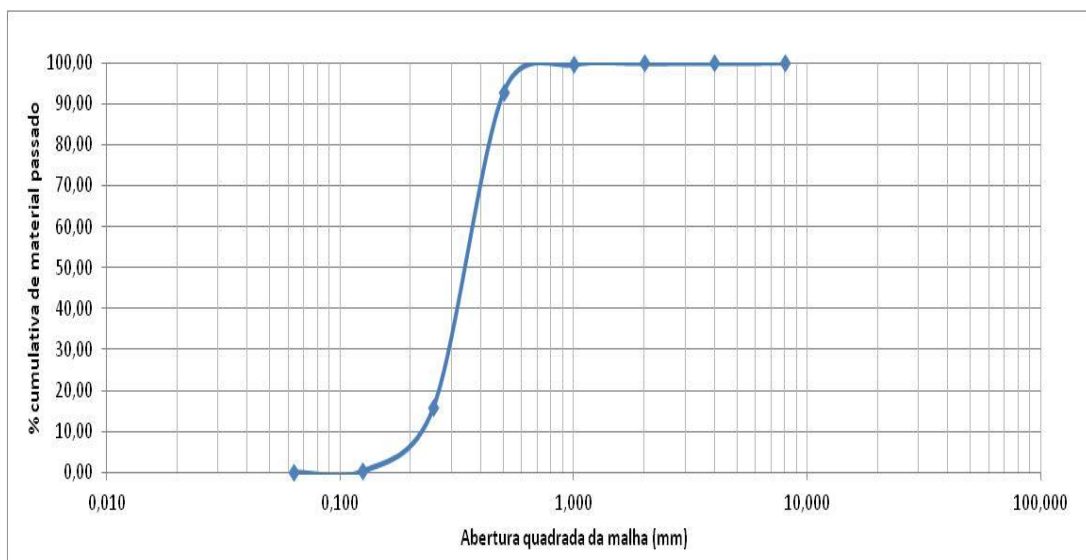


Figura 36- Curva granulométrica

6.3.1.1- Classificação Unificada da Areia

A norma que se utiliza aquando da classificação unificada de um solo é a ASTM D 2487-85.

Através da análise da curva granulométrica (Figura 36) e da tabela com as percentagens retidas e passadas em cada peneiro (Tabela 5), podemos calcular o coeficiente de uniformidade e o coeficiente de curvatura, C_u e C_c respetivamente através das seguintes fórmulas:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (6.1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})} \quad (6.2)$$

Onde:

C_u - coeficiente de uniformidade;

C_c - coeficiente de curvatura;

D_{10} , D_{30} e D_{60} - diâmetro efetivo a 10, 30 e 60% respetivamente.

Os valores de D_{10} , D_{30} e D_{60} são, 0,23 , 0,29 e 0,37 respetivamente. O valor de C_u e de C_c são respetivamente 1,61 e 0,99.

Desta forma, podemos classificar o solo como uma Areia mal graduada (i) SP.

6.3.1.2- Classificação para fins rodoviários

A classificação para fins rodoviários é feita segundo a norma LNEC E 240 - 1970. Através da análise desta mesma norma, e tendo em conta que estamos perante uma areia granular lavada, sem finos, não plástica, conclui-se que estamos perante uma areia do tipo A-3, ou seja, é uma areia fina, com comportamento na camada sob o pavimento de características excelente a bom.

6.3.2- Densidade das partículas

A densidade das partículas da areia foi determinada segundo a norma NP-EN 1097-6 - Determinação da massa volúmica e absorção de água. Segundo a norma, a densidade das partículas é calculada a partir da razão entre massa e volume.

Para a realização do ensaio, são necessários vários utensílios que se encontram enumerados na norma.

Segundo o anexo A.4 - Método do picnómetro para partículas de agregado de dimensão entre 0,063 e 31,5mm da norma, o procedimento a usar é:

- ✓ Pesar o picnómetro e funil (m1)
- ✓ Colocar o provete elementar dentro do picnómetro, inserir o funil e pesar a massa do conjunto (m2)
- ✓ Encher o picnómetro com água. Agitar cuidadosamente com uma vareta de modo a remover o ar incluído e as bolhas de ar aderentes;
- ✓ Encher o picnómetro com água até ao traço de referência (Figura 37), secar cuidadosamente as superfícies exteriores e pesar (m3).

Utilizaram-se dois picnómetros, neste caso, para obter um valor com melhor correção.



Figura 37- Picnómetro com água até ao traço de referência

Com estes dados, calcula-se ρ_p sendo:

$$\rho_p = \frac{(m_2 - m_1)}{\frac{[V - (m_3 - m_2)]}{\rho_w}} \quad (6.3)$$

Onde:

- m1- massa do picnómetro e funil (g)
- m2- massa do picnómetro, funil e provete elementar (g)
- m3- massa do picnómetro, funil, provete elementar e água (g)
- m4- massa do picnómetro, funil e água (g)
- V- volume do picnómetro (ml)
- ρ_w - massa volúmica da água à temperatura do ensaio (19°C) (Mg/m³)

ρ_p - massa volúmica das partículas secas (Mg/m^3)

ρ_w - 0,9984

Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Cálculo da massa volúmica das partículas

	Picnómetro 71	Picnómetro 73
m1	219,650	223,080
m2	479,330	454,590
m3	1055,280	1035,090
m4	893,530	889,860
V	673,880	666,780
ρ_p	2,647	2,683
Valor Final Corrigido	2,665	

Assim, o valor da massa volúmica das partículas é de $2,665 \text{ g/cm}^3$.

6.3.3- Baridade

A baridade da areia determinou-se através da norma NP EN 1097-3. Segundo a norma, a baridade de um solo é o quociente entre a massa do agregado seco, preenchendo sem compactação um dado recipiente, pela capacidade do recipiente. A capacidade mínima do recipiente é escolhida de acordo com a dimensão máxima do agregado (Tabela 7). Os materiais e procedimentos de ensaio encontram-se descritos na norma, apresentando-se apenas os valores intermédios para cada provete e o resultado final (Tabela 8).

Tabela 7- Capacidade mínima do recipiente em função da dimensão máxima do agregado

Máxima dimensão do agregado (D) (mm)	Capacidade (l)
Até 4	1,0
Até 16	5,0
Até 31,5	10
Até 63	20

A baridade é calculada em cada provete elementar segundo a equação:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (6.4)$$

Onde:

- m1- massa do recipiente vazio (Kg)
- m2- massa do recipiente e do provete elementar (Kg)
- m3- massa do recipiente cheio com água (Kg)
- V- capacidade do recipiente (l)
- ρ_b - baridade do agregado (Mg/m^3)

Tabela 8 - Cálculo da baridade do solo

	Proвете 1	Proвете 2	Proвете 3
m1	0,104	0,104	0,104
m2	1,648	1,657	1,642
m3	1,110	1,110	1,110
V	1,000	1,000	1,000
ρ_b	1,544	1,553	1,538
Valor Final Corrigido	1,545		

Assim sendo, o valor da baridade do solo é de $1,545 \text{ Mg/m}^3$

6.3.4- Teor em água

O teor em água determina-se segundo a norma NP 84. Segundo a norma, o teor em água é o quociente em percentagem, entre a massa de água que se evapora a temperaturas de 105 e 110°C pela massa do provete depois de seco.

O teor em água calcula-se através da expressão:

$$w = 100 \times \left(\frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \right) \quad (6.5)$$

Onde:

w- teor em água (%);

m1- massa da cápsula (g);

m2- massa da cápsula mais o solo, antes da secagem (g);

m3- massa da cápsula mais o solo, depois da secagem (g).

Os resultados estão apresentados na

Tabela 9.

Tabela 9 -Cálculo do teor em água

Massa da cápsula (g)	220,27
Massa da cápsula + solo (g)	696,44
Massa da cápsula + solo seco em estufa (g)	696,02
Massa do solo seco em estufa (g)	475,75
Massa de água (g)	0,42
Teor em água, w (%)	0,09%

Assim sendo, o solo apresenta um teor em água de 0,09 %.

6.3.5- Percentagem de vazios

A percentagem de vazios do solo determinou-se através da norma NP EN 1097-3. Segundo a norma, a percentagem de vazios é a proporção volumétrica de vazios no recipiente e é calculada segundo a seguinte expressão:

$$v' = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \quad (6.6)$$

Onde:

v'- representa a percentagem de vazios

ρ_b - representa a baridade (Mg/m³)

ρ_p - representa a massa volúmica real do agregado seco em estufa (Mg/m³)

Visto que o valor da baridade e da massa volúmica já foram calculados anteriormente, facilmente se encontra o valor da percentagem de vazios. Assim sendo:

$$v' = 42,05 \%$$

6.4- Ensaio realizados e procedimentos respetivos

6.4.1- Primeira Fase - Congelamento com 0g de sal por Kg de areia

Numa primeira fase de ensaios, e com o auxílio do equipamento descrito no ponto 6.2- do presente documento, submeteu-se uma areia saturada sem qualquer adição de sal ao processo de congelamento.

Todo o estudo, referente ao congelamento da areia com 0g de sal por Kg de areia seca, foi feito numa fase anterior ao trabalho desenvolvido na presente dissertação e pode ser consultado na tese de mestrado MARCOS (2011).

O registo das temperaturas pode ser consultado no Anexo III- Registo de Temperaturas (1ª Fase) do presente documento.

6.4.2- Segunda Fase - Congelamento com 1,5g de sal por Kg de areia

Nesta segunda fase de ensaios, colocou-se areia no reservatório R1. Foram ainda colocados dois tubos de congelamento e quatro sondas para registos de temperaturas. Os tubos foram colocados na diagonal e distam entre si 74cm, enquanto que da parede do reservatório 30cm cada um (Figura 40).

A colocação das sondas foi feita em grupos de dois, uma à cota do fundo dos tubos de congelamento e outra próxima da cota de topo da areia como mostra a Figura 39.

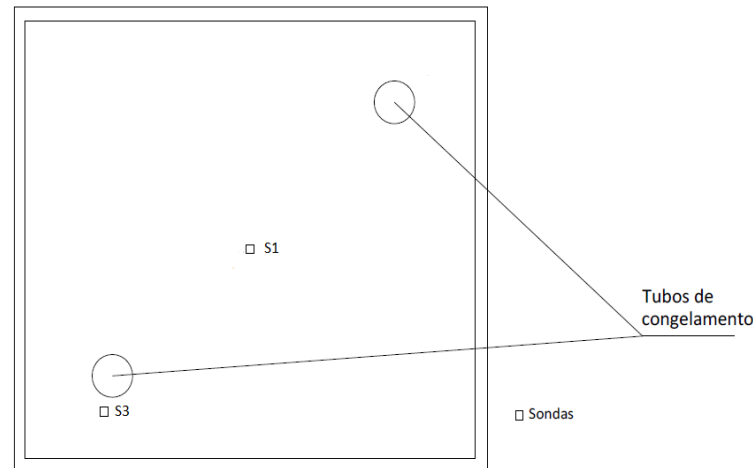


Figura 38- Planta do reservatório R1 com a colocação das sondas

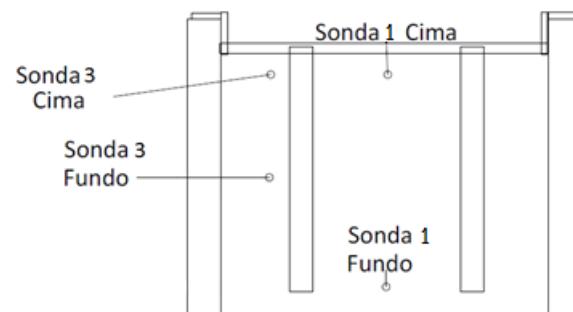


Figura 39- Esquema de colocação das sondas

A colocação das sondas fez-se com o intuito de obter um registo de temperaturas numa zona próxima dos tubos de congelamento (sonda 3 cimo e fundo) e numa zona a meio dos dois tubos de congelamento (sonda 1 cimo e fundo).

A distância vertical do ponto de leitura das sondas superiores foi de 20 cm medidos a partir do topo do reservatório e a sonda inferior 1 foi de 15 cm medidos desde a base do reservatório, enquanto que a sonda inferior 3 foi de 31 cm medidos desde a base do reservatório. A distância horizontal do ponto de leitura das sondas também foi tida em consideração pelo que as sondas 3 (cimo e fundo) ficaram a 3 cm do tubo de congelamento, enquanto que as sondas 1 (cimo e fundo) ficaram a 37 cm do mesmo (Figura 39).



Figura 40 - Disposição dos tubos de congelamento

A colocação da areia foi intercalada com adição de água salgada fazendo com que a areia ficasse saturada e ao mesmo tempo que contivesse um teor em sal de $1,5\text{g/Kg}$ areia. Este processo encontra-se descrito na Figura 42 e Figura 43.

A água adicionada para saturar a areia foi previamente calculada, de acordo com o índice de vazios da areia e com a quantidade de areia colocada no reservatório R1, isto é, como a areia tem um índice de vazios de 42% e o reservatório contém $0,8\text{m}^3$ de areia, então para a total saturação da areia usaram-se 336 litros de água.

Por outro lado, como se queria analisar qual a influência do sal no desenrolar do congelamento da areia, e estando previamente decidido que se iriam adicionar $1,5\text{g}$ de sal por cada Kg de areia, sabendo que a areia tem uma massa volúmica de $1,6\text{ g/cm}^3$, adicionaram-se $1,920\text{Kg}$ de sal nos 336 litros de água (Figura 41) .



Figura 41- Mistura da água com o sal



Figura 42- Colocação da sonda 1 de fundo



Figura 43- Final da preparação do ensaio (2ª fase)

Depois de saturada a areia, foi iniciado o processo de congelamento como mostra a Figura 44. Cerca de 8 dias depois do início do processo, já era visível a formação de um bolbo de areia congelada em redor dos tubos de congelamento (Figura 45).



Figura 44- Início do processo de congelamento (2ª fase)



Figura 45- Formação de um bolbo próximo do tubo de congelamento - 8º dia

Aproximadamente 21 dias após ter sido iniciado o processo de congelamento da areia, iniciou-se o esvaziamento do reservatório do ensaio de forma cuidadosa e gradual por forma a observar o estado dos bolbos formados em redor de cada um dos tubos de congelamento. Após o esvaziamento parcial do reservatório, registou-se o estado de cada um dos bolbos e retiraram-se os diâmetros superior e na zona intermédia de cada um como demonstram a Figura 46, Figura 47 e Figura 48.



Figura 46- Bolbos formados com o congelamento da areia (2ª fase).



Figura 47- Medição do diâmetro superior do bolbo resultante do congelamento.



Figura 48- Medição do diâmetro na zona intermédia do bolbo resultante de congelamento.

O registo das temperaturas pode ser consultado no Anexo IV- Registo de Temperaturas (2ª Fase) do presente documento e, de uma forma mais detalhada, no ficheiro excel inserido no CD da dissertação, com intervalos de leitura de 30 minutos para as datas compreendidas entre 31/01/2013 e 21/02/2013.

6.4.3- Terceira fase - Congelamento com 3,0g de sal por Kg de areia

Depois da realização da segunda fase do ensaio, aguardou-se uns dias até que toda a areia estivesse completamente descongelada em torno dos tubos de congelamento e procedeu-se novamente à introdução de areia no reservatório R1. Visto que a areia já continha um teor em sal de 1,5g/Kg de areia, e como se pretendia visualizar qual o efeito deste no desenrolar do congelamento e das temperaturas envolvidas no processo, nesta 3ª fase do ensaio, pretendeu-se chegar a um teor em sal de 3,0g/Kg de areia. Assim, adicionaram-se mais 3,0 Kg de sal dissolvidos em 70 l de água à areia fazendo aumentar desta forma o seu teor em sal.

A disposição dos tubos de congelamento foi a mesma que na 2ª fase do ensaio, bem como a colocação das sondas e respetivas distâncias relativamente ao topo e fundo do reservatório (distância vertical) e as distâncias em relação ao tubo de congelamento (distância horizontal).

Depois da maior parte da água salgada utilizada para saturar a areia ter sido absorvida, iniciou-se o congelamento agora com um novo teor em sal (Figura 49).



Figura 49- Início do congelamento (3ª fase).

Um dia após o início do congelamento ainda não eram visíveis grandes alterações a nível do solo como mostra a Figura 50.



Figura 50- Primeiro dia do congelamento (3ª fase).

Sensivelmente 15 dias depois do início do processo eram visíveis em torno dos tubos de congelamento grandes massas de gelo na superfície bem como no esqueleto sólido da areia (Figura 51).



Figura 51- Formação do bolbo em torno do tubo de congelamento (15º dia).

Após terem passado 20 dias desde o início do congelamento, iniciou-se o esvaziamento do reservatório (Figura 52) com o intuito de verificar qual o estado dos bolbos formados bem como, proceder ao levantamento dos diâmetros superior e da zona intermédia de cada um dos bolbos tal como tinha sido feito na 2ª fase do ensaio como demonstram a Figura 53 e Figura 54.



Figura 52- Bolbos formados com o congelamento da areia (3ª fase).



Figura 53- Medição do diâmetro superior de um dos bolbos resultantes do congelamento



Figura 54- Medição do diâmetro na zona intermédia de um dos bolbos resultante do congelamento

O registo das temperaturas pode ser consultado no Anexo V- Registo de Temperaturas (3ª Fase) do presente documento e, de uma forma mais detalhada, no ficheiro excel inserido no CD da dissertação, com intervalos de leitura de 30 minutos para as datas compreendidas entre 14/03/2013 e 03/04/2013.

6.5- Tratamento de dados

6.5.1- Análise comparativa entre as três fases de ensaio

Depois de retirados todos os dados referentes a cada uma das três fases de ensaio, fez-se a comparação entre os resultados obtidos para os ensaios com um teor de sal de 0, 1,5 e 3,0 g de sal por cada Kg de areia.

A análise foi feita de acordo com o registo das temperaturas ao longo dos dias nas diferentes sondas colocadas no reservatório, ou seja, nas quatro sondas, duas superiores

e duas inferiores. Foi também observada a relação do diâmetro médio efetivo de cada um dos bolbos para as diferentes concentrações de sal, bem como se registraram as temperaturas vencidas em cada uma das fases de ensaio.

Finalmente compararam-se os consumos energéticos decorrentes de cada uma das fases de ensaio.

6.5.1.1- Temperatura Vs Tempo

Os resultados apresentados serão em forma de gráfico, estando toda a informação de forma mais detalhada em tabelas, no ficheiro excel que se encontra no CD da dissertação.

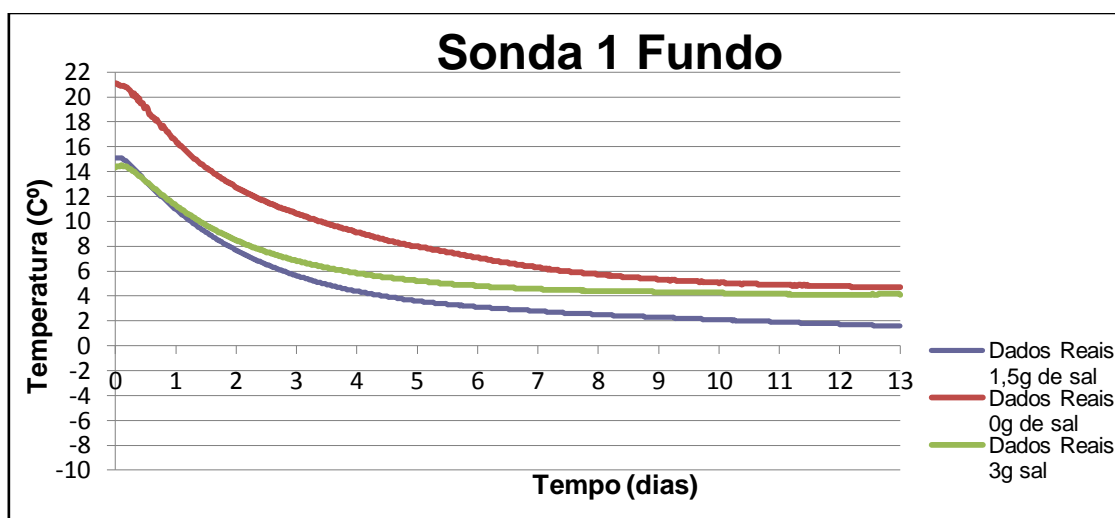


Figura 55- Gráfico Temperatura Vs Tempo para os 3 teores de sal diferentes - Sonda 1 Fundo

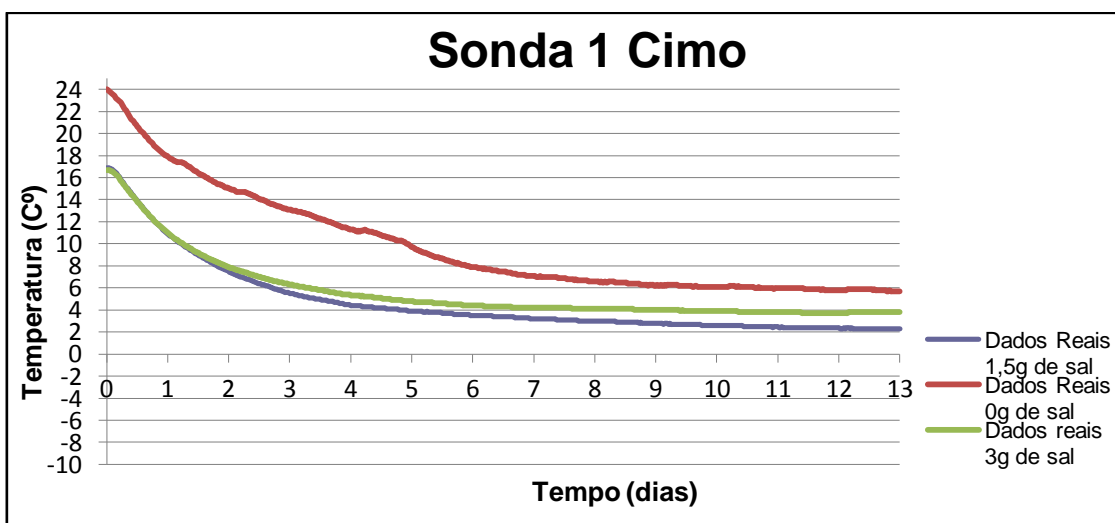


Figura 56- Gráfico Temperatura Vs Tempo para os 3 teores de sal diferentes - Sonda 1 Cimo

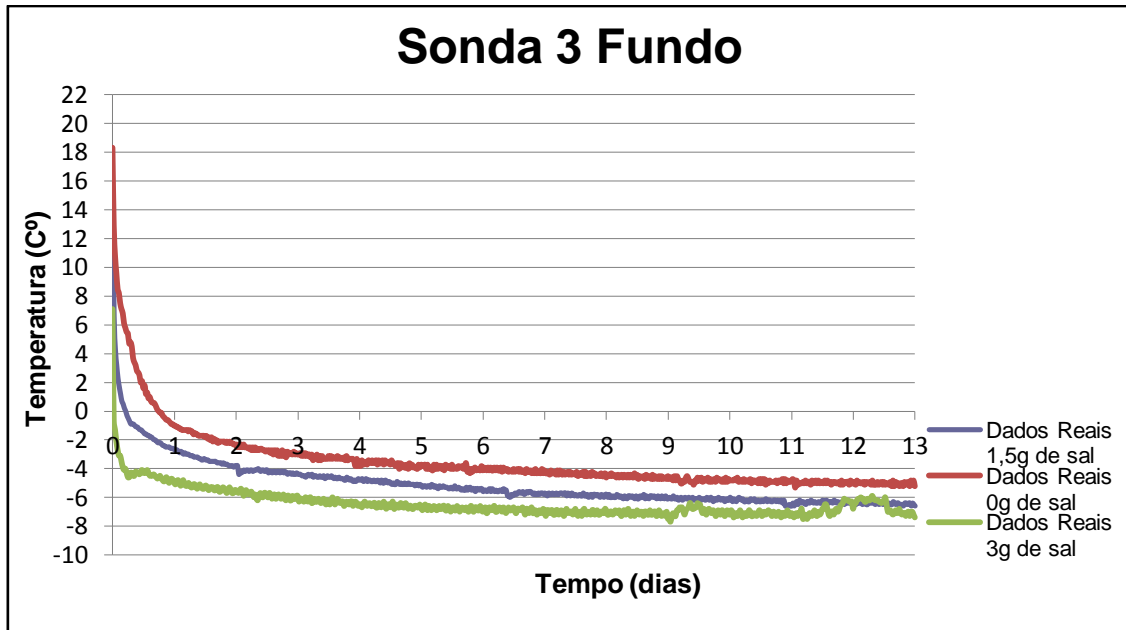


Figura 57- Gráfico Temperatura Vs Tempo para os 3 teores de sal diferentes - Sonda 3 Fundo

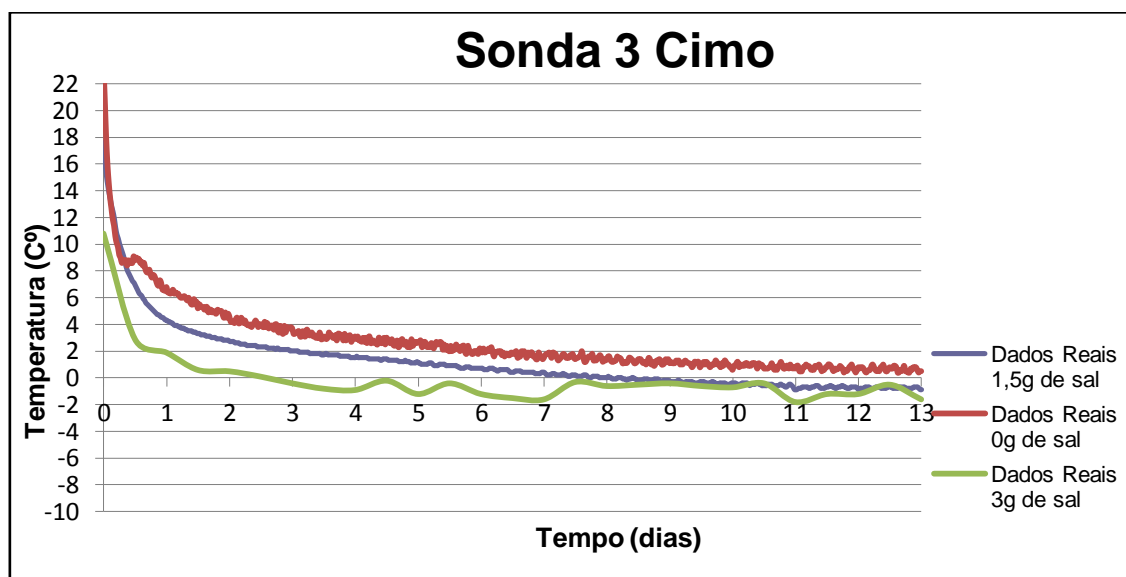


Figura 58- Gráfico Temperatura Vs Tempo para os 3 teores de sal diferentes - Sonda 3 Cimo

6.5.1.2- Diâmetro efetivo dos bolbos

Em cada uma das fases de ensaio formaram-se bolbos junto a cada um dos tubos de congelamento, aos quais foram retirados os diâmetros superior e numa zona intermédia. Com esses dados procedeu-se ao cálculo do diâmetro médio efetivo para cada um dos bolbos, de onde resultou:

Tabela 10- Diâmetros efetivos dos bolbos resultantes do congelamento para cada uma das fases de ensaio

Ensaio	Bolbo 1 (cm)		Média (cm)	Bolbo 2 (cm)		Média (cm)
	Superior	Intermédio		Superior	Intermédio	
Real com 0g de sal	30,0	40,0	35,0	30,0	40,0	35,0
Real com 1,5g de sal	25,0	40,0	32,5	20,0	41,0	30,5
Real com 3,0g de sal	24,5	39,5	32,0	18,0	38,0	28,0

6.5.1.3- Temperaturas vencidas

Em cada uma das 3 fases de ensaio existiu uma diminuição significativa entre a temperatura registada em cada uma das sondas no início do ensaio e no seu término.

Assim:

Tabela 11- Temperaturas vencidas em cada uma das fases de ensaio e nas diferentes sondas

Ensaio	Sonda 1 (°C)		Sonda 3 (°C)	
	Cimo	Fundo	Cimo	Fundo
Real com 0g de sal	18,3	16,4	22,9	23,5
Real com 1,5g de sal	14,6	13,5	18,5	20,8
Real com 3,0g de sal	12,9	10,2	12,4	14,5

6.5.1.4- Consumo Energético

No decorrer de todas as fases de ensaio foram contabilizados, diariamente os gastos energéticos resultantes do processo de congelamento. Com os dados adquiridos, elaborou-se uma tabela com o preço efetivo diário para conseguir congelar o volume de areia utilizado, para cada uma das fases de ensaio como mostram a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 12- Consumo energético para a 1ª fase de ensaio

Valor Inicial	1338	kWh
Valor Final	1828	kWh
Total Dias	14	Dias
Diferença entre valor inicial e final	490	kWh
Consumo médio diário	35,00	kWh
Preço kWh	0,1210	€
Volume do reservatório	0,9	m ³
Volume de areia utilizado	0,8	m ³
Preço efetivo para congelar o volume de areia utilizado	74,11	€
Preço efetivo por dia para congelar o volume de areia utilizado	5,29	€

Tabela 13- Consumo energético para a 2ª fase de ensaio

Valor Inicial	2226	kWh
Valor Final	2877	kWh
Total Dias	21	Dias
Diferença entre valor inicial e final	651	kWh
Consumo médio diário	31,00	kWh
Preço kWh	0,1210	€
Volume do reservatório	0,9	m ³
Volume de areia utilizado	0,8	m ³
Preço efetivo para congelar o volume de areia utilizado	98,46	€
Preço efectivo por dia para congelar o volume de areia utilizado	4,69	€

Tabela 14- Consumo energético para a 3ª fase de ensaio

Valor Inicial	3086	kWh
Valor Final	3704	kWh
Total Dias	20	Dias
Diferença entre valor inicial e final	618	kWh
Consumo médio diário	30,90	kWh
Preço kWh	0,1210	€
Volume do reservatório	0,9	m ³
Volume de areia utilizado	0,8	m ³
Preço efetivo para congelar o volume de areia utilizado	93,47	€
Preço efetivo por dia para congelar o volume de areia utilizado	4,67	€

6.6- Ensaio do modelo teórico com a ajuda do software TEMP/W

Após terem sido realizadas todas as fases do ensaio, com o auxílio do equipamento descrito no ponto 6.2-, tentaram-se aproximar os dados reais registados na 2ª fase de ensaio (1,5g de sal por Kg de areia) com o modelo teórico. Para tal, criou-se um modelo teórico em tudo idêntico ao modelo real usado.

O software TEMP/W permite a introdução de diversos fatores tais como, condições fronteira iniciais e finais, tipos de materiais e as suas características térmicas, temperaturas e número de iterações, iterações essas que nos permitem verificar qual o avanço da temperatura ao longo do tempo nos materiais introduzidos, com o decorrer do processo de congelamento.

Assim sendo, a finalidade da modelação teórica prende-se com, verificando que o modelo teórico construído se encontra próximo da situação real, e nesse caso, poder introduzir novos materiais no modelo, com propriedades distintas das introduzidas inicialmente e prever qual a evolução da temperatura nestes, de forma clara e precisa sem acarretar custos.

6.6.1- Características do reservatório

O reservatório modelado que foi introduzido no programa é em tudo semelhante ao reservatório R1, tendo sido introduzido no software com as seguintes características:

- ✓ Altura - 0,9 metros;
- ✓ Largura - 1,0 metros;
- ✓ Espessura do isolamento - 0,10 metros.

A representação do reservatório no software é feita a duas dimensões, sendo a zona escolhida para ser representada, a secção onde estão colocados os tubos de congelamento como indica a Figura 59. A diagonal tem um comprimento equivalente, no reservatório a 1,40 metros.

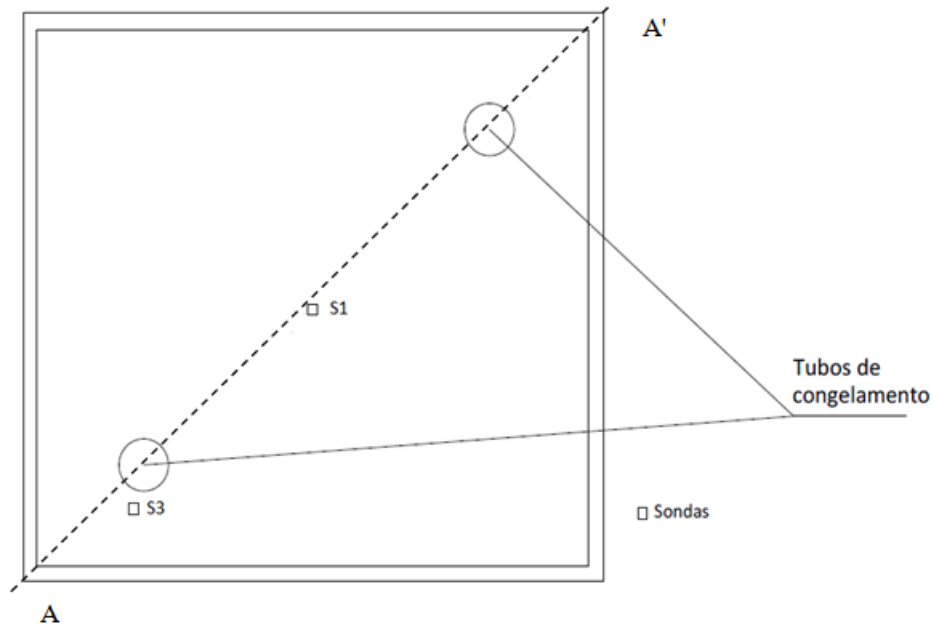


Figura 59- Planta do reservatório R1 com o corte AA'

Os tubos de congelamento foram colocados a 30 cm de cada uma das esquinas do reservatório, a altura de cada um dos tubos de congelamento é de 75 cm e o seu diâmetro de 0,7 cm.

6.6.2- Condições fronteira do modelo

Para existir uma proximidade entre o modelo teórico e a realidade é necessário impor condições fronteira em todas as regiões do reservatório que foi introduzido no software. É necessário introduzir as condições fronteira iniciais e as condições fronteira finais, pois, só assim, o software consegue atingir um equilíbrio de temperaturas no período de tempo imposto pelo programador.

No caso em estudo foram impostas as seguintes condições fronteira (Figura 60):

- ✓ Temperatura ambiente;
- ✓ Temperatura de contacto entre o betão e o reservatório;
- ✓ Temperatura inicial da areia
- ✓ Temperatura de contacto reservatório/areia;
- ✓ Temperatura de saída dos tubos de congelamento;
- ✓ Temperatura inicial nos tubos de congelamento;
- ✓ Temperatura no topo da areia (fase final do congelamento).

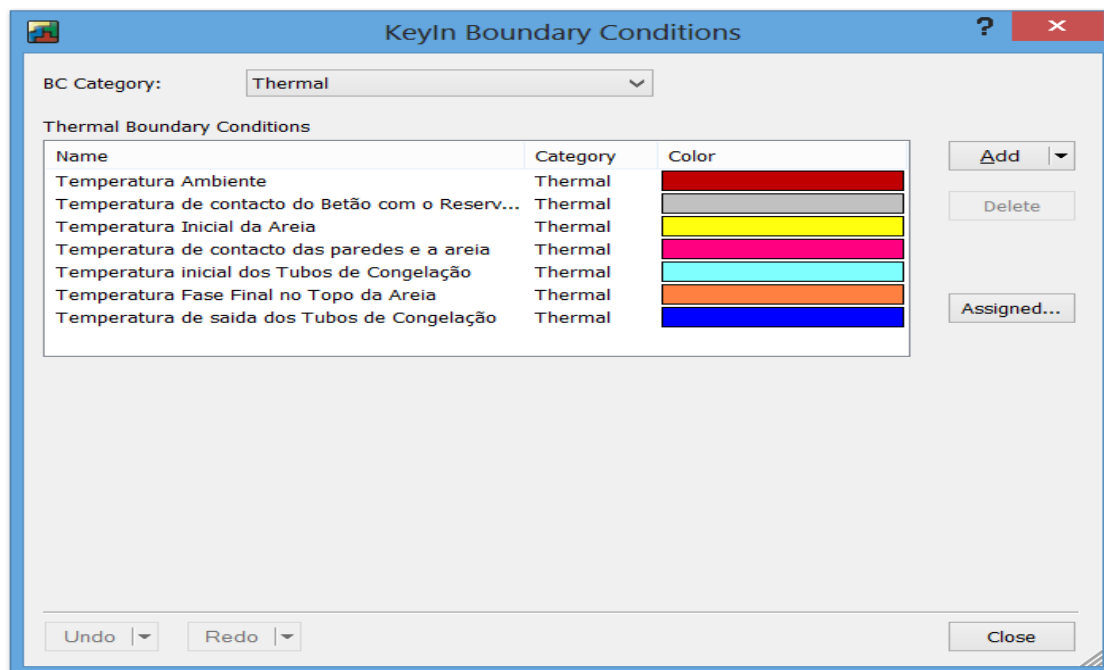


Figura 60- Condições fronteira impostas no modelo

As condições fronteiras admitidas no modelo teórico foram estipuladas de acordo com as temperaturas reais existentes no local e foram consideradas condições fronteira iniciais e finais (Figura 61 e Figura 62) para se poder ver qual a evolução da temperatura ao longo dos dias.

Os únicos aspetos que diferem entre as condições fronteira iniciais e finais, são que para as condições fronteira finais, se retira a temperatura inicial da areia para que possa existir um equilíbrio entre a temperatura inicial da areia e a temperatura de saída dos tubos de congelamento e finalmente, a substituição da temperatura no topo da areia para as condições fronteira iniciais e finais, que variaram de 20°C para 4°C.

Foram assim impostas as seguintes condições fronteira:

- ✓ Temperatura ambiente : 20°C;
- ✓ Temperatura de contato do betão com o reservatório : 7°C;
- ✓ Temperatura inicial da areia : 22°C;
- ✓ Temperatura de contato das paredes do reservatório com a areia : 4°C;
- ✓ Temperatura inicial nos tubos de congelação : -8,75°C;
- ✓ Temperatura final nos tubos de congelação : -8,75°C;
- ✓ Temperatura fase final no topo da areia: 4°C.

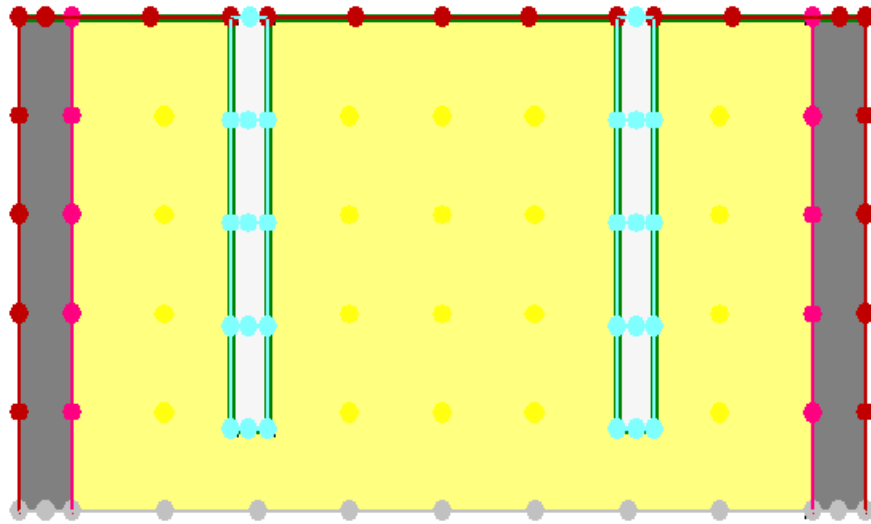


Figura 61- Condições fronteira iniciais

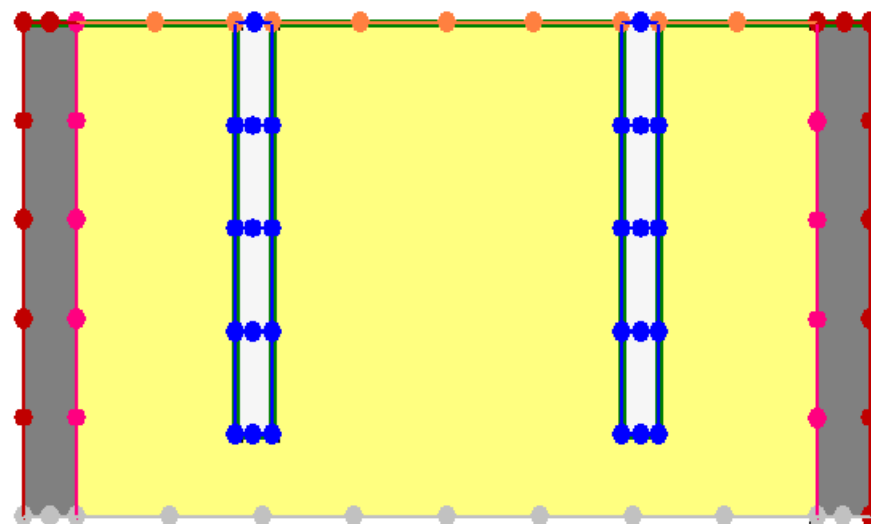


Figura 62- Condições fronteira finais

6.6.3- Propriedades da areia e do isolamento

As propriedades da areia congelada e descongelada foram adquiridas com o auxílio dos gráficos existentes no manual do software, que podem ser consultados no capítulo 3- do presente documento.

Considerando que a areia tem uma percentagem de vazios de 42% como foi calculado no ponto 6.3.5- do presente documento vem:

- ✓ Condutividade térmica (descongelada): 245 Kj/dia/m/°C;
- ✓ Condutividade térmica (congelada): 320 Kj/dia/m/°C;
- ✓ Capacidade térmica volumétrica (descongelada): 3000 Kj/m³/°C;
- ✓ Capacidade térmica volumétrica (congelada): 1900 Kj/m³/°C;
- ✓ Conteúdo volumétrico de água "*in-situ*": 0,42 m³/m³.

As propriedades do isolamento de poliestireno consideradas foram:

- ✓ Condutividade térmica (descongelada): 0,037 Kj/dia/m/°C;
- ✓ Condutividade térmica (congelada): 0,037 Kj/dia/m/°C;
- ✓ Capacidade térmica volumétrica (descongelada): 1,5 Kj/m³/°C;
- ✓ Capacidade térmica volumétrica (congelada): 1,5 Kj/m³/°C;
- ✓ Conteúdo volumétrico de água "*in-situ*": 0 m³/m³.

6.6.4- Resultados obtidos na modelação teórica para um período de 20 dias

Depois de introduzidos no software todos os dados necessários para que este consiga efetuar a modelação, isto é, definiram-se quais as condições fronteira iniciais e finais, as propriedades dos materiais, as características do reservatório e dos tubos de congelamento, o local de colocação das sondas, e ainda o intervalo de tempo no qual se vai registar a evolução das temperaturas, obteve-se o seguinte modelo teórico:

- ✓ Situação inicial (0 dias congelamento)

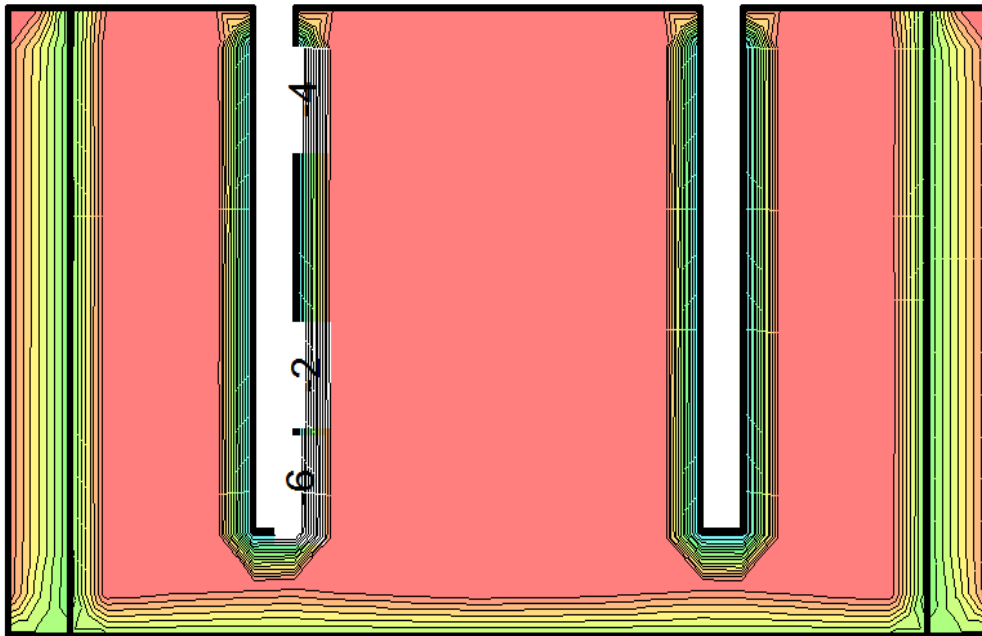


Figura 63- Situação inicial do congelamento do reservatório R1 com areia.

- ✓ Situação após 1 dia de congelamento

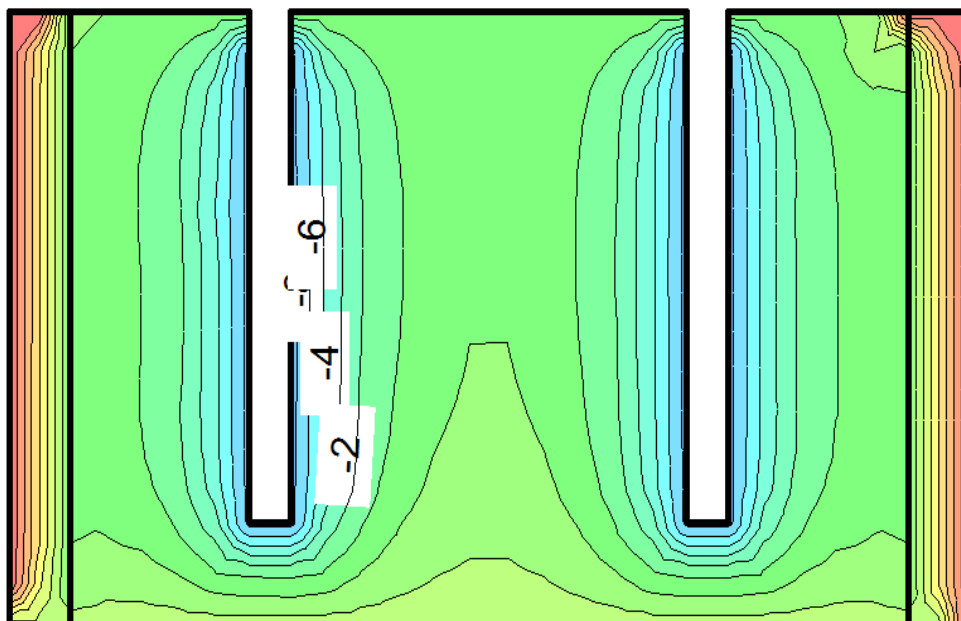


Figura 64- Situação de congelamento do reservatório R1 com areia após 1 dia

- ✓ Situação após 5 dias de congelamento

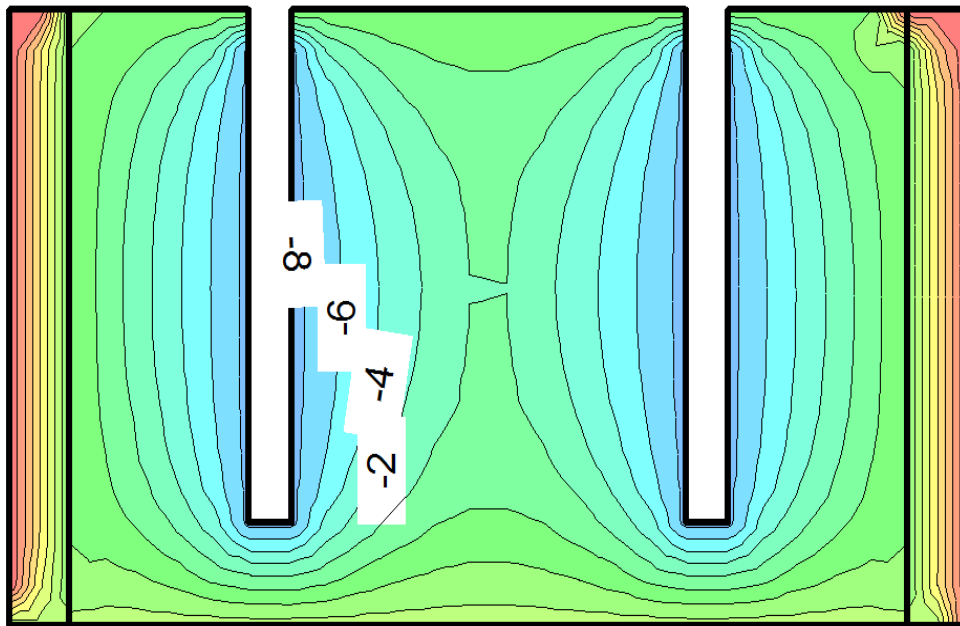


Figura 65- Situação de congelamento do reservatório R1 com areia após 5 dias

- ✓ Situação após 10 dias de congelamento

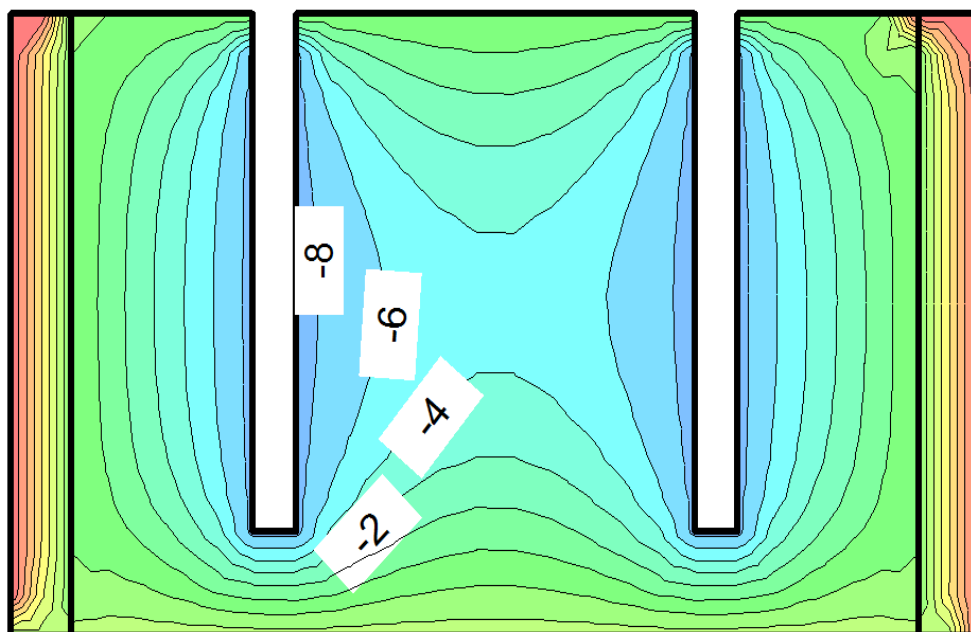


Figura 66- Situação de congelamento do reservatório R1 com areia após 10 dias

✓ Situação final (20 dias de congelamento)

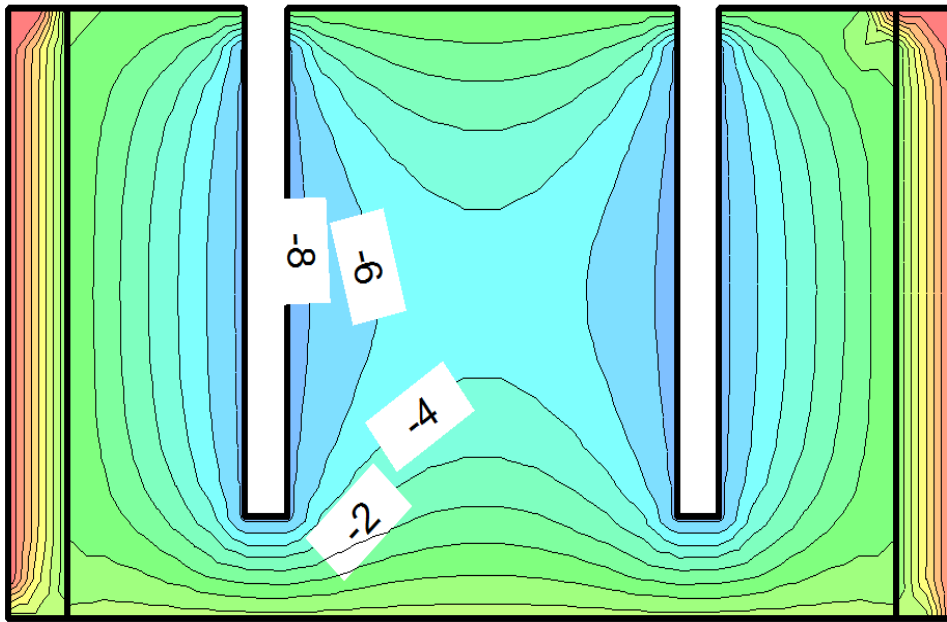


Figura 67- Situação final de congelamento do reservatório R1 com areia após 20 dias

6.7- Tratamento de dados

6.7.1- Análise comparativa entre a 2ª fase do ensaio real Vs Modelação Teórica

Após se introduzir todos os dados referentes ao modelo teórico no software, fez-se a comparação entre os dados reais referentes à 2ª fase do ensaio (1,5g de sal por Kg de areia) e os dados retirados do modelo teórico. No modelo teórico definem-se, através da malha quadrada previamente estabelecida, os locais onde queremos retirar os dados para comparação, ou seja, a localização exata das sondas. Neste caso, a sonda 1 cimo localiza-se a 10cm do topo do reservatório, enquanto que a sonda 1 fundo se encontra a 15cm da base do reservatório. Relativamente ao grupo de sondas 3, a sonda 3 cimo encontra-se a 10cm do topo do reservatório, enquanto que a sonda 3 fundo se encontra a 31cm do fundo do reservatório.

6.7.1.1- Dados recolhidos no modelo teórico

Os dados retirados do modelo teórico para cada uma das quatro sondas colocadas (duas superiores e duas inferiores), encontram-se no Anexo VI- Registo de temperaturas no modelo teórico do presente documento, respetivamente a Tabela 20 e Tabela 22 para as sondas superiores e a Tabela 21 e Tabela 23 para as sondas inferiores.

6.7.1.2- Comparação entre os dados teóricos Vs dados reais

Surgem neste ponto os gráficos onde estão registadas as temperaturas ao longo do tempo nas duas fases a ser comparadas.

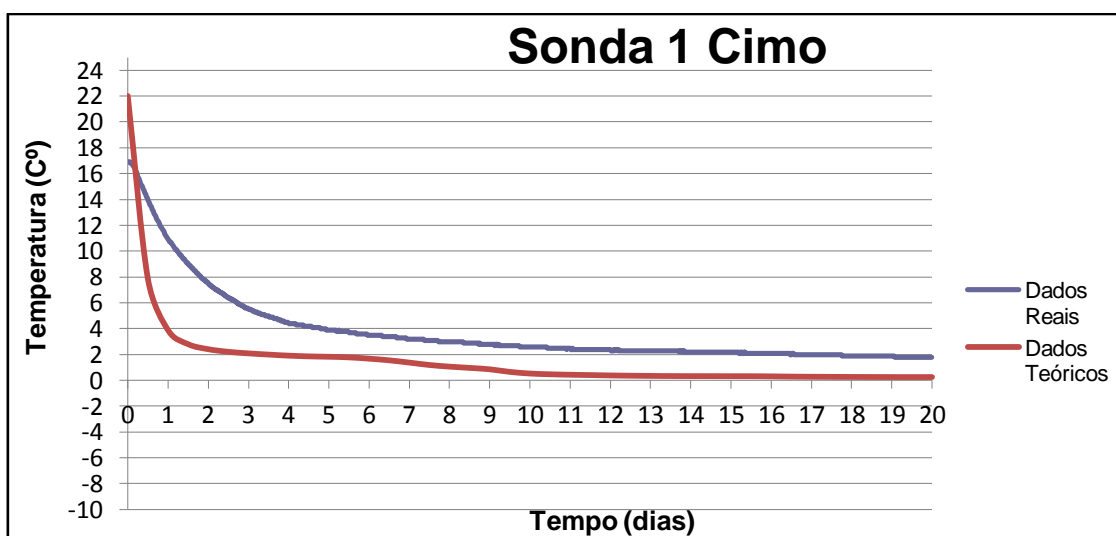


Figura 68- Gráfico Temperatura Vs Tempo - sonda 1 cimo

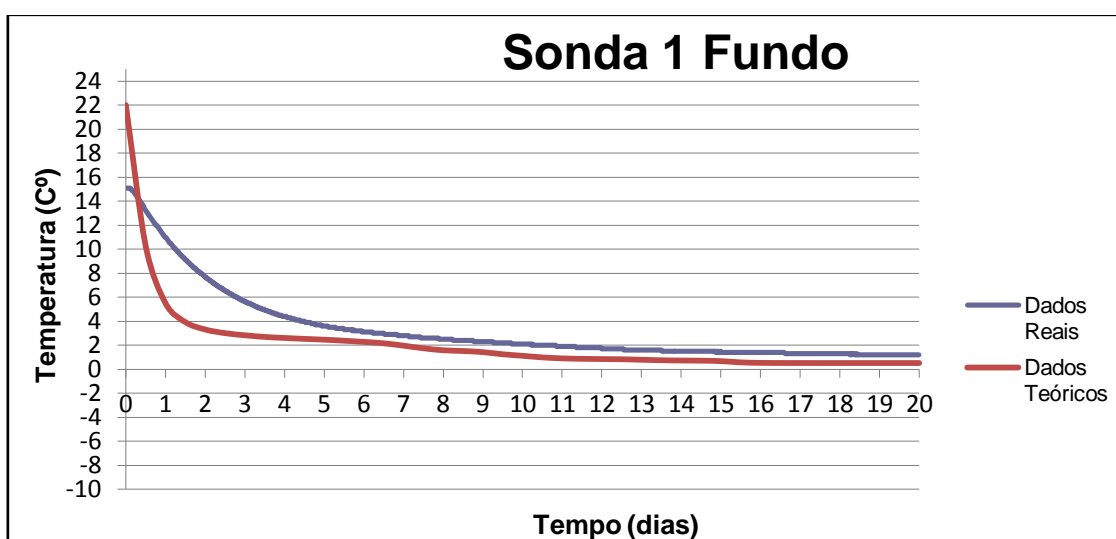


Figura 69- Gráfico Temperatura Vs Tempo - Sonda 1 fundo

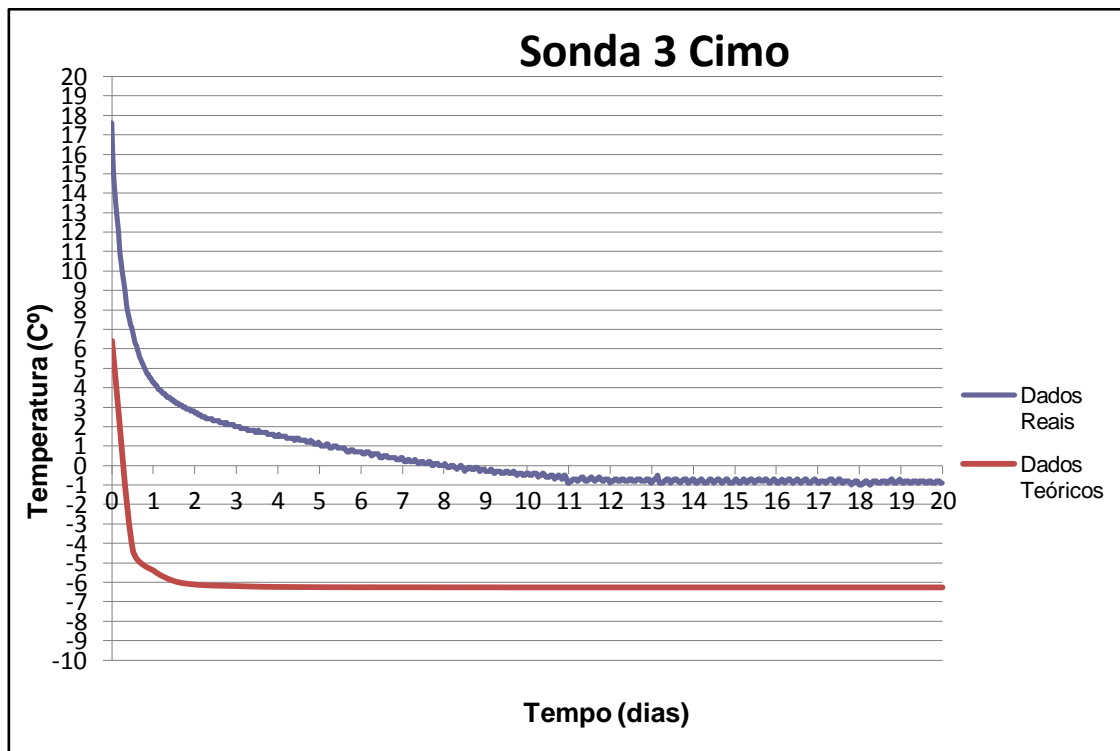


Figura 70- Gráfico Temperatura Vs Tempo - Sonda 3 cimo

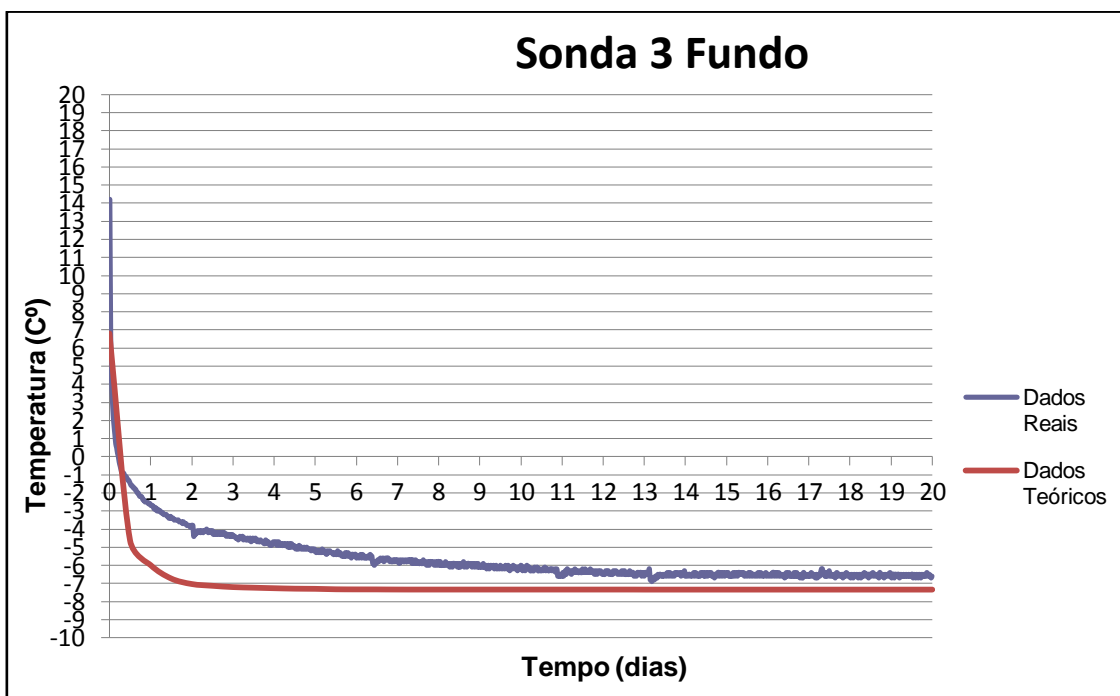


Figura 71- Gráfico Temperatura Vs Tempo - sonda 3 fundo

6.8- Discussão

Neste ponto é feita uma análise crítica a todos os procedimentos e ensaios realizados, bem como a todos os aspetos que tenham interferência direta ou indireta nos resultados obtidos. Procura-se ainda encontrar possíveis falhas e as respetivas causas, assim como resultados fora do contexto, por forma a que, num futuro, estas falhas não sucedam e já se saiba convenientemente como proceder quando sujeitos a uma situação adversa.

A primeira fase dos ensaios esta relacionada com o congelamento de uma areia num meio aquoso com uma salinidade de 0g de sal por Kg de areia, enquanto que a segunda e terceira fases dos ensaios se baseiam no congelamento de uma areia num meio aquoso com uma salinidade de 1,5g de sal por Kg de areia e 3,0g de sal por Kg de areia respetivamente.

Analisando os resultados obtidos em cada uma das sondas instaladas, verificou-se que as temperaturas registadas nas sondas "3 cimo" e "3 fundo" são menores que as registadas por sua vez nas sondas "1 cimo" e "1 fundo", facto que seria de esperar, visto que, as sondas "3 cimo" e "3 fundo" se encontram mais próximas do tubo de congelamento e dessa forma apresentam temperaturas mais baixas. É também importante ressaltar que as sondas de cima apresentam temperaturas superiores as temperaturas de fundo, isto resulta do facto das sondas de fundo se encontrarem numa zona onde a temperatura da areia já está mais baixa que a zona do topo visto que, no topo, a areia se encontra em contacto com o ambiente exterior. É importante ainda salientar que existe a possibilidade das temperaturas de saída do tubo de congelamento serem inferiores no fundo do tubo ao invés do seu topo, provocando assim um maior arrefecimento na zona mais baixa do reservatório e, dessa forma, registarem-se assim temperaturas inferiores nas sondas colocadas no fundo comparando com as sondas colocadas em cima.

As diferenças de temperatura registadas em diversos pontos do reservatório poderão ser reduzidas, impondo por exemplo menores distâncias entre os tubos de congelamento provocando assim uma uniformização global da temperatura em todo o reservatório. Com a análise feita ao registo das temperaturas em cada uma das sondas, poderá prever-se também que o raio de ação dos tubos de congelamento continuaria a aumentar se o processo de congelamento continuasse, apesar de que esse aumento seria praticamente

impercetível visto que as temperaturas não sofrem grandes alterações nos últimos dias do processo de congelamento. Este facto é passível de ser visto, com recurso à análise gráfica obtida através do registo das temperaturas Vs tempo decorrido. Através da análise gráfica poder-se-á prever o comportamento do congelamento.

Durante os primeiros dias de congelamento, regista-se uma diminuição mais acentuada da temperatura em qualquer uma das sondas colocadas, comparando com os restantes dias onde essa mesma diminuição ocorre de uma forma mais lenta. Não significa isto que exista um maior rendimento no processo de congelamento nos primeiros dias, existe sim uma diferença superior na ordem de grandeza das temperaturas vencidas.

A colocação das sondas pode também ser discutida, visto que aquando da colocação das sondas nas três fases do ensaio real, estas são colocadas enquanto se está a inserir areia no reservatório o que pode de alguma forma fazer com que as sondas se desloquem podendo essas diferenças de posição significar temperaturas diferentes. Desta forma, quando foi construído o modelo teórico, a escolha dos pontos onde se colocam as sondas pode não coincidir de forma exata, com a sua posição real no reservatório.

Relativamente à comparação entre cada uma das três fases do ensaio real, existem explicações para as diferenças visíveis nos gráficos construídos. Para além da posição das sondas poder ser diferente em cada uma das três fases, como foi dito anteriormente, o teor de sal em cada uma destas mesmas fases é diferente, o que resulta numa variação da temperatura de congelamento, isto é, quanto maior o teor em sal, mais difícil se torna o processo de congelamento, tornando-se mais delicado atingir temperaturas mais baixas, facto comprovado com a análise gráfica. Apesar de, em todas as sondas, se registar uma temperatura inferior na fase final do ensaio, no ensaio com 3,0g de sal por Kg de areia ao invés do que seria de esperar visto que, quanto maior o teor em sal, mais difícil se torna o processo de congelamento, a explicação existente é de que, como se pode comprovar com o auxílio da Tabela 11, as temperaturas vencidas em qualquer uma das sondas para a primeira fase de ensaio são superiores às temperaturas vencidas na segunda fase de ensaios e, por seu turno, esta última apresenta maior amplitude nas temperaturas vencidas que aquelas que foram vencidas na terceira fase do ensaio. Este facto vem de encontro com o esperado, isto é, maior teor em sal implica temperaturas de congelamento inferiores.

Relativamente à formação dos bolbos de areia em torno dos tubos de congelamento, verificou-se que estes têm maior diâmetro na primeira fase do ensaio, seguindo-se a segunda fase e por fim a terceira como seria de esperar visto que, um aumento na quantidade de sal implica que se forme uma película em torno das partículas do solo, dificultando assim a agregação das mesmas fazendo, desta forma, que os bolbos tenham menores dimensões em proporcionalidade inversa ao teor de sal, isto é, maiores bolbos formam-se quando a salinidade existente é inferior.

Outro ponto de interesse prende-se com a comparação entre o ensaio teórico Vs ensaio real (2ª fase do ensaio real), onde, por análise gráfica se pode ver que existem diferenças entre os dois gráficos para qualquer uma das sondas colocadas. Para além de pequenas diferenças ocorridas na colocação das sondas como já foi explicado anteriormente, fazendo alterar, assim, os valores de temperatura registada ao longo dos dias, existem outros fatores que podem levar a que se registem essas diferenças a nível gráfico entre os dois ensaios. A primeira razão aparente é o facto de que no modelo teórico a cota da areia se encontrar ao nível da superfície do reservatório, enquanto que no ensaio real isso não acontece, estando esse mesmo nível a 10cm do topo do reservatório. Isto poderá alterar os valores de temperaturas registados nas sondas superiores uma vez que a temperatura exterior e a temperatura da areia inicialmente são diferentes bem como as propriedades quer da areia quer do ar exterior, e, sendo assim, ao serem introduzidos valores diferentes, os resultados obtidos serão também eles diferentes. Outra explicação possível reside no facto das condições fronteira inicialmente introduzidas no modelo não estarem corretas em relação ao que se passa na realidade, isto é, por exemplo na modelação estipulou-se que a temperatura de contacto da areia com as paredes do reservatório foi de 4°C, valor que poderá não ser o correto.

Efetuando uma análise pormenorizada aos gráficos resultantes da comparação entre os dois ensaios para cada uma das sondas, verifica-se que em qualquer uma das sondas colocadas as temperaturas reais são superiores às temperaturas modeladas. A causa destas diferenças poderá encontrar-se na temperatura de saída dos tubos de congelamento introduzida pelo utilizador no software de modelação, e nas perdas de calor existentes no sistema de congelamento. Se subirmos a temperatura de saída dos tubos de congelamento, conseguiremos aumentar as temperaturas registadas nas sondas do modelo teórico aproximando assim os valores reais dos valores teóricos.

Uma outra curiosidade prende-se com o facto das sondas de fundo ("1 fundo" e "3 fundo") apresentarem valores mais próximos comparando os dados reais e os dados teóricos, enquanto que as sondas de cima ("1 cima" e "3 cima") apresentam uma maior oscilação. A causa destas variações poderá prender-se com o facto de as sondas colocadas no fundo estarem mais isoladas relativamente ao ambiente exterior, enquanto que as sondas de cima se encontram mais próximas da superfície do reservatório podendo desta forma alterar o valor das temperaturas registado no modelo real, enquanto que no modelo teórico este fator não afeta a temperatura registada nas sondas visto que, a temperatura dos materiais e todas as características do reservatório bem como a colocação exata das sondas são parâmetros totalmente controlados pelo utilizador. Outro aspeto a ter em consideração é o de que, em todas as sondas, os valores registados no ensaio real se situam bastante próximos dos valores registados no modelo teórico, havendo apenas numa das sondas, "3 cima" uma diferença significativa entre os valores de temperatura registados no modelo teórico e real, variação essa que ronda os - 5°C. Esta variação poderá estar relacionada com a colocação da própria sonda e possíveis oscilações, que fazem com que as temperaturas registadas entre ambos os modelos oscilem, assim como, com as perdas de calor existentes no sistema de congelamento.

É também de registar que, nas sondas colocadas entre os dois tubos de congelamento, no caso as sondas "1 cima" e "1 fundo", existe uma variação mais significativa na inclinação das linhas representativas da evolução das temperaturas no modelo teórico próximo do sexto dia de congelamento. Isto acontece pois, neste dia, dá-se a interseção dos bolbos formados pelos dois tubos de congelamento. Assim sendo, colocando os tubos de congelamento mais próximos, conseguimos obter temperaturas mais baixas de congelamento como já foi dito anteriormente, uma vez que os raios de ação de cada um dos tubos de congelamento se intersetem. No ensaio real, este facto não sucedeu visto que as sondas ficaram colocadas fora do raio de alcance dos tubos de congelamento e não se deu a interseção dos bolbos formados em torno de cada um dos tubos. Essa mesma interseção não aconteceu no ensaio real por diversos fatores tais como, o posicionamento das sondas e dos próprios tubos de congelamento, perdas de rendimento da máquina de congelamento e no interface entre o ambiente exterior e o reservatório onde se estava a realizar o ensaio. Pelo contrário, no ensaio teórico todos estes

parâmetros foram devidamente acautelados e tidos em consideração dando-se assim a interseção dos bolbos formados por ambos os tubos de congelamento.

Em termos económicos e tendo em conta apenas o gasto energético referente a todo o processo de congelamento, não contabilizando quer o gasto existente na aquisição dos materiais quer o custo com o equipamento e sua manutenção, o valor apresentado em qualquer das fases de ensaio serve somente para prever qual o gasto energético numa situação de congelamento deste género. Embora não seja a tradução da realidade "*in situ*", referindo cada uma das fases de ensaio de forma isolada, vemos que o consumo energético diário provocado pela máquina de congelamento é bastante similar em todos eles, uma vez que a partir de um determinado intervalo de tempo, se atinge o equilíbrio entre o solo congelado e não congelado. A explicação para estes resultados poderá subsistir no facto de que na primeira fase de ensaios a temperatura inicial da areia bem como a temperatura exterior serem superiores que as existentes nas duas fases de ensaio seguintes, sendo necessário um maior esforço e gasto energético da máquina de congelamento para conseguir baixar a temperatura da areia existente no reservatório. Consequentemente e através desta análise, podemos prever que alterações no tipo de refrigerante usado no processo de congelamento, na dimensão dos tubos de congelamento assim como na sua colocação e no número de tubos colocados e ainda na dimensão do próprio reservatório de ensaio, serão naturalmente responsáveis por uma alteração relativamente aos valores obtidos.

Finalmente abordando o equipamento de congelamento, de circuito fechado, com propilenoglicol como refrigerante, atingem-se temperaturas negativas que variam entre os - 18°C e os -21°C. Se fosse utilizado um sistema de refrigeração em circuito aberto, com azoto líquido por exemplo, as temperaturas atingidas seriam bastante mais baixas. O número dos tubos de congelamento a ser usados, bem como a sua colocação e o próprio raio dos mesmos é outro fator determinante no processo de congelamento. Se o raio dos tubos de congelamento fosse superior, poderia garantir-se um melhor rendimento do equipamento de congelamento, aumentando dessa forma a área congelada visto que o raio de ação de cada um dos tubos seria superior. Se o número de tubos de congelamento colocados fosse também ele superior, conseguir-se-ia também uma maior área congelada.

7- CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1- Conclusões gerais

Tendo em conta que a técnica de congelamento de solos é cada vez mais utilizada (embora pouco aprofundada em Portugal), nesta dissertação procurou-se aperfeiçoar o conhecimento desta técnica, recorrendo a ensaios laboratoriais no sentido de perceber se é possível aplicá-la com sucesso e segurança para uma melhor estabilização temporária do solo bem como para um controlo do fluxo de águas subterrâneas.

Os objetivos propostos no início deste trabalho foram, de uma maneira geral, satisfatoriamente alcançados.

De referir que foi utilizado o software TEMP/W para modelar um reservatório com areia saturada. Esse reservatório foi congelado na prática com o sistema de congelamento da Universidade de Aveiro.

Foi feita também uma análise prática a nível de temperaturas, num ensaio compreendido em 3 fases, cada uma delas com teores de sal diferentes. Através destes ensaios, percebe-se qual o efeito do sal no congelamento de um solo, isto é, quanto maior o teor de sal, maior o intervalo de tempo para que o solo congele na sua totalidade, maior o volume de água não congelada existente no interior do mesmo e menor a massa de solo efetivamente congelada.

Os resultados obtidos da comparação entre o modelo teórico e os dados reais revelam-se bastante coerentes, o que nos permite ter boas projeções no que toca à fiabilidade da aplicação desta técnica no futuro. Assim, tomando como referência os modelos teóricos, é possível prever o comportamento de determinados tipos de solos congelados na realidade.

Com a realização da presente dissertação o nível de conhecimento e informação sobre a técnica de congelamento de solos foi aprofundado com sucesso.

7.2- Desenvolvimentos futuros

Futuramente, seria interessante realizar ensaios de congelamento com outros tipos de solo, para verificar qual a resposta destes ao processo de congelamento. Desta forma, adquiriam-se melhores competências e conhecimentos respeitantes à técnica de congelamento de solos.

Seria útil analisar qual a permeabilidade de um solo congelado através de ensaios laboratoriais complementares.

Após se concluir o congelamento de um solo, e verificar qual a dimensão dos bolbos formados em redor dos tubos de congelamento, seria benéfico, analisar as propriedades mecânicas destes bem como a variação dos seus parâmetros de acordo com o teor de água, cargas impostas e salinidade.

Através do software de modelação poderão ser introduzidos outros tipos de materiais com propriedades distintas das usadas nesta dissertação, e verificar qual o cenário teórico previsto para assim poder acompanhar o que irá suceder na realidade, caso se aplique um congelamento nas condições sugeridas no modelo.

Poderá ainda ser feito outro estudo variando a posição dos tubos de congelamento no reservatório, determinando assim a influência que a posição tem no raio de ação do tubo, assim como, analisando se os bolbos formados junto aos tubos de congelamento se interseam e, caso se verifique, que efeitos provoca no registo das temperaturas. O número de tubos também poderá ser alterado, fazendo depois um rácio entre o tempo de congelamento, que no caso irá decrescer caso se aumente o número de tubos, e o custo do processo de congelamento, que irá subir caso aumentem o número de tubos de congelamento.

O refrigerante utilizado no sistema de congelamento também poderá ser substituído, por outro produto, analisando-se posteriormente se este traz vantagens ou desvantagens relativamente ao já utilizado.

Finalmente poderá tentar adaptar-se o sistema de congelamento existente transformando-o num sistema misto, por forma a que o arranque do congelamento seja feito de forma mais rápida com uso de nitrogénio líquido, e a permanência do solo congelado ser feita com uso de salmoura. Analisando os registos de temperaturas adquiridos com esse novo sistema bem como verificando qual o consumo energético

efetivo do processo, poderá verificar-se se um sistema misto acarreta vantagens em relação ao sistema em uso atual, ou seja um sistema de circuito fechado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRLIQUIDE - Disponível em: <http://www.airliquide.pt/>. Última consulta a: 28 de Outubro de 2011.

AL-HOURI, ZAIN MOHAMMED - Modifications on the existing design parameters to improve the performance of infiltration treatment BMPS in cold climates. Washington State University, 2008.

ALMEIDA, NUNO GONÇALO MARQUES DE - Técnicas de Melhoria de Solos. Vol. Parte 1 Oeiras: Construlink Press, 2003.

ARENSON, LUKAS U.; SEGO, DAVID C. - Freezing processes for a coarse sand with varying salinities. Proceedings of the Cold Regions Engineering & Construction Conference, 2004.

ARENSON, LUKAS U.; SRINGMAN, SARAH M.; SEGO, DAVE C. - The Rheology of Frozen Soils. Applied Rheology, Vol. 17, n.º 1 2007, p. 12147 1-14.

BAYER, FRANZ; MULLER, BENNO - Infrastructure Ground Freezing Technology, 2010.

BENTA, AGOSTINHO; BARBOSA, LUÍS - Sistema de congelamento de solos. Universidade de Aveiro, 2010.

BING, HUI; MA, WEI - Laboratory investigation of the freezing point of saline soil. Cold Regions Science and Technology, Vol. 67 2011, p. 79-88.

BRIAUD, H. L. - The Pressuremeter. Roterdã: A.A.Balkema: Trans Tech Publications, 1992.

CARVALHO, MÁRCIA CRISTINA PINTO DA SILVA - Técnicas de congelação de solos. Universidade de Aveiro, 2010. Tese Mestrado.

CAVALCANTE, ERINALDO HILÁRIO - Mecânica dos Solos II - Notas de Aulas Aracaju: Universidade Federal de Sergipe, 2006.

CAVALCANTI, V.M.M.; FREIRE, G.S.S - A possibilidade de utilização de areias marinhas como agregado na construção civil na região metropolitana de Fortaleza, estado do Ceará. 2007.

CDM - Disponível em: <http://www.cdm.com/>. Última consulta a: 20 de Novembro de 2011.

CONSTRUCTOR, THE - Latest trends in ground improvement techniques. Disponível em: <http://www.theconstructor.org/>. Última consulta a: 22 de Outubro de 2011.

COUNCIL, NATIONAL RESEARCH - Geological and geotechnical engineering in the new millennium: Opportunities for research and technological innovation. 2001.

CRISTELO, NUNO - Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Universidade do Minho, 2001. Tese Mestrado.

DEVELOPMENT, SEED - SCHLUMBERGER EXCELLENCE IN EDUCATIONAL - Viagem ao Pólo Norte: Um alvo difícil você sabia...? Disponível em: <http://www.planetseed.com/pt-br/node/16412>. Última consulta a: 3 de Outubro 2012.

FERNANDES, MANUEL DE MATOS - Mecânica dos Solos. FEUP, 1994.

FONTAINE, EDUARDO BEIRA - Utilização de ensaios geotécnicos especiais de campo (cone elétrico e pressiómetro) em solos do interior do estado de São Paulo. Campinas, 2004.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL, LTD - Thermal Modeling with TEMP/W. An Engineering Methodology. Calgary, Alberta, Canada, 2012.

GEOCIÊNCIAS, UNIVERSIDADE DE AVEIRO_DEPARTAMENTO DE - Disponível em: http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com_content&view=category&id=9&Itemid=15. Última consulta a: 20 de Setembro de 2013.

GEOTÉCNICA, DAMASCO PENNA - ENGENHARIA - Ensaaios com o Dilatómetro de Marchetti (DMT).

GRAVIMETA - Disponível em: <http://www.gravimeta.pt/>. Última consulta a: 25 de Fevereiro de 2012.

GUD - Geotechnic and Dynamic. Disponível em: <http://gudconsult.de/>. Última consulta a: 22 de Outubro de 2011.

HARRIS, JOHN S - Ground Freezing in Practice: Thomas Telford, 1995.

HAZIRBABA, KENAN; GULLU, HAMZA - California Bearing Ratio improvement and freeze-thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid. Cold Regions Science and Technology, ISSN 0165-232X. Vol. 63, n.º 1-2 2010, p. 50-60.

HELMUT, HAB; PETER, SCHÄFERS - Application of Ground Freezing for Underground Construction in Soft Ground, 2005.

JOHN, WILEY; SONS - Geotechnical Engineering Handbook, Procedures, 2003.

KRAHN, JOHN - Thermal Modeling with TEMP/W. An Engineering Methodology, 2004.

LINDE - Disponível em: <http://www.linde.pt/>. Última consulta a: 12 de Novembro de 2011.

LOUREIRO, TELMA HELENA ATAÍDE - Aspectos Geotécnicos na Construção de Túneis em Áreas Urbanas Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa, 2008. Tese Mestrado.

MARCOS, AMÉRICO PEDRO PEREIRA - Estabilização Temporária de Areias por Congelamento. Universidade de Aveiro, 2011. Tese Mestrado.

MOO Y. LEE, ARLO FOSSUM, LAURENCE S. COSTIN, DAVID BRONOWSKI - Frozen Soil Material Testing and Constitutive Modeling, 2002.

MORETRENCH - Disponível em: <http://www.moretrench.com/>. Última consulta a: 17 de Novembro de 2011.

NGUYEN, A. D. [et al.] - The dependence of strength and modulus of frozen saline sand on temperature strain rate and salinity. GEO 2010. Calgary, Alberta, 2010.

QI, JILIN; HU, WEI; MA, WEI - Experimental study of a pseudo-preconsolidation pressure in frozen soils. Cold Regions Science and Technology, ISSN 0165-232X. Vol. 60, n.º 3 2010, p. 230-233.

SCHMALL, PAUL C.; MAISHMAN, DEREK - Ground Freezing a proven technology in mine shaft sinking, 2007.

SCHNAID, F. - 'Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. 1ª edição. Oficina de Textos, São Paulo, 2000.

SCHULTZ, MICHAEL; GILBERT, MICHAEL; HASS, HELMUT - Ground Freezing - principles, applications and practices: Tunnels & Tunnelling International, 2008.

SILVA, ELISA MARIA DE JESUS DA - O ensaio Pressiométrico: Metodologia de Ensaio e Calibração do Equipamento, 2001.

SOFTWARE, GEOTECHNICAL ENGINEERING - Geo Slope International Ltd. Disponível em: <http://www.geo-slope.com/>. Última consulta a: 26 de Novembro de 2011.

SOILFREEZE - Disponível em: <http://www.cryocell.com/>. Consultado em: 27 de Outubro de 2011.

TONON, FLUVIO; LIU, XIAN; WU, WEI - Deep and Underground excavations, 2010.

VIEIRA, PATRÍCIA ISABEL DOS SANTOS - Determinação dos erros de medição associados ao Ensaio PMT. Universidade de Aveiro, 2009.

YU, WENBING [et al.] - In situ determination of mechanical properties of frozen soils with the pressuremeter. Cold Regions Science and Technology, ISSN 0165-232X. Vol. 34, n.º 3 2002, p. 179-189.

ZITREC - Disponível em: <http://www.zitrec.com/>. Última consulta a: 27 de Outubro de 2011.

ANEXOS

Anexo I- Condutividade Térmica de alguns materiais

Tabela 15- Condutividade térmica de alguns materiais (adaptado de: (GEO-SLOPE INTERNATIONAL, 2012).

Material	Conductivity
	kJ/(dia.m.°C)
Water	52,27
Ice	192,7
Air (dry still)	2,07
Snow	
Loose, new	7,43
On ground	10,45
Dense, compacted	29,37
Soil and rock minerals	
Shale	129,6
Evaporites	466,6
limestone	112-432
Dolomite	432
Sandstone	155-86,4
Shist	138,24
Gneiss	216
Greenstone	285,12
Slate	328,3
Argillite	285,12
Quartzite	388,8-613
Granite	146,9-345,6
Diabase	181,4
Gabbro	216
Grandiorite	224,6

Anexo II- Capacidade Térmica Volumétrica de alguns materiais

Tabela 16- Capacidade térmica volumétrica de alguns materiais (adaptado de: GEO-SLOPE INTERNATIONAL (2012)).

Material	Volumetric Heat Capacity
	kJ/(m³.°C)
Water	4187
Ice	1880
Air	1,25
Soil minerals	1875
Organic soil minerals	2520
Extruded polystyrene insulation	43,5
Concrete	2010
Asphalt	2520
Snow fresh	209
Snow, drifted and compacted	523,5
Granite	2490
Limestone	3285
Dolomite	2510
Sandstone	2510
Shale	1840
Glass	1760
Steel	3890
Wood	523

Anexo III- Registo de Temperaturas (1ª Fase)

Tabela 17- Registo de temperaturas da 1ª fase de ensaio (0,0 g de sal por Kg de areia).

Data	Hora	Dias	FUNDO (°C)		CIMO (°C)	
			Sonda1	Sonda3	Sonda1	Sonda3
03/06/2011	13:56	0,00	21,1	18,3	24,0	23,4
04/06/2011	01:56	0,50	19,2	1,6	20,6	8,8
04/06/2011	13:56	1,00	16,5	-1,0	17,9	6,8
05/06/2011	01:56	1,50	14,3	-1,8	16,4	5,2
05/06/2011	13:56	2,00	12,7	-2,3	15,0	4,6
06/06/2011	01:56	2,50	11,6	-2,7	14,1	4,0
06/06/2011	13:56	3,00	10,6	-3,0	13,1	3,7
07/06/2011	01:56	3,50	9,8	-3,1	12,3	3,1
07/06/2011	13:48	3,98	9,1	-3,8	11,3	3,0
08/06/2011	01:48	4,48	8,5	-3,5	10,8	2,5
08/06/2011	13:48	4,98	8,0	-3,9	9,8	2,6
09/06/2011	01:48	5,48	7,5	-4,0	8,7	2,1
09/06/2011	13:48	5,98	7,1	-3,8	7,9	2,2
10/06/2011	01:48	6,48	6,7	-4,2	7,5	1,9
10/06/2011	13:48	6,98	6,3	-4,3	7,1	1,4
11/06/2011	01:48	7,48	6,0	-4,3	6,9	1,5
11/06/2011	13:48	7,98	5,7	-4,3	6,6	1,3
12/06/2011	01:48	8,48	5,5	-4,6	6,5	1,2
12/06/2011	13:48	8,98	5,3	-4,7	6,2	1,4
13/06/2011	01:48	9,48	5,2	-4,6	6,2	0,8
13/06/2011	13:48	9,98	5,1	-4,7	6,1	0,8
14/06/2011	01:48	10,48	5,0	-4,7	6,1	0,9
14/06/2011	13:48	10,98	4,9	-4,9	6,0	0,8
15/06/2011	01:48	11,48	4,8	-4,9	5,9	0,8
15/06/2011	13:48	11,98	4,8	-5,0	5,8	0,6
16/06/2011	01:48	12,48	4,7	-5,1	5,9	0,7
16/06/2011	13:48	12,98	4,7	-4,8	5,7	0,5
17/06/2011	01:48	13,48	4,6	-5,2	5,7	0,3

Anexo IV- Registo de Temperaturas (2ª Fase)

Tabela 18- Registo de temperaturas da 2ª fase de ensaio (1,5 g de sal por Kg de areia).

Data	Hora	Dias	FUNDO (°C)		CIMO (°C)	
			Sonda1	Sonda3	Sonda1	Sonda3
31/01/2013	11:20	0,00	15,1	14,2	16,9	17,6
31/01/2013	23:20	0,50	13,2	-1,5	13,9	6,9
01/02/2013	11:20	1,00	11,0	-2,7	10,9	4,3
01/02/2013	23:20	1,50	9,1	-3,4	9,0	3,3
02/02/2013	11:20	2,00	7,7	-3,8	7,5	2,7
02/02/2013	23:20	2,50	6,5	-4,1	6,4	2,3
03/02/2013	11:20	3,00	5,6	-4,4	5,5	2,0
03/02/2013	23:20	3,50	4,9	-4,6	5,0	1,7
04/02/2013	11:20	4,00	4,4	-4,8	4,4	1,5
04/02/2013	23:20	4,50	4,0	-5,0	4,2	1,4
05/02/2013	11:20	5,00	3,6	-5,2	3,9	1,1
05/02/2013	23:20	5,50	3,3	-5,4	3,7	0,9
06/02/2013	11:20	6,00	3,1	-5,6	3,5	0,7
06/02/2013	23:20	6,50	3,0	-5,8	3,4	0,4
07/02/2013	11:20	7,00	2,8	-5,7	3,2	0,4
07/02/2013	23:20	7,50	2,6	-5,8	3,1	0,2
08/02/2013	11:20	8,00	2,5	-5,8	3,0	0,0
08/02/2013	23:20	8,50	2,4	-6,1	2,9	-0,3
09/02/2013	11:20	9,00	2,3	-6,1	2,8	-0,3
09/02/2013	23:20	9,50	2,2	-6,0	2,7	-0,3
10/02/2013	11:20	10,00	2,1	-6,0	2,6	-0,4
10/02/2013	23:20	10,50	2,0	-6,3	2,5	-0,6
11/02/2013	11:20	11,00	1,9	-6,6	2,5	-0,9
11/02/2013	23:20	11,50	1,8	-6,2	2,4	-0,7
12/02/2013	11:20	12,00	1,7	-6,4	2,4	-0,9
12/02/2013	23:20	12,50	1,7	-6,4	2,3	-0,7
13/02/2013	11:20	13,00	1,6	-6,6	2,3	-0,9
13/02/2013	23:20	13,50	1,6	-6,5	2,3	-0,8
14/02/2013	11:20	14,00	1,5	-6,6	2,2	-0,7
14/02/2013	23:20	14,50	1,5	-6,4	2,2	-0,9
15/02/2013	11:20	15,00	1,5	-6,5	2,2	-0,8
15/02/2013	23:20	15,50	1,4	-6,6	2,1	-0,8
16/02/2013	11:20	16,00	1,4	-6,5	2,1	-0,8
16/02/2013	23:20	16,50	1,4	-6,5	2,0	-0,7
17/02/2013	11:20	17,00	1,3	-6,5	2,0	-0,9
17/02/2013	23:20	17,50	1,3	-6,3	2,0	-0,7
18/02/2013	11:20	18,00	1,3	-6,6	1,9	-1,0
18/02/2013	23:20	18,50	1,2	-6,5	1,9	-0,9
19/02/2013	11:20	19,00	1,2	-6,6	1,9	-0,8
19/02/2013	23:20	19,50	1,2	-6,5	1,8	-0,8
20/02/2013	11:20	20,00	1,2	-6,6	1,8	-0,9
20/02/2013	23:20	20,50	1,2	-6,6	1,8	-0,8
21/02/2013	11:20	21,00	1,2	-6,5	1,8	-0,8

Anexo V- Registo de Temperaturas (3ª Fase)

Tabela 19- Registo de temperaturas da 3ª fase de ensaio (3,0 g de sal por Kg de areia).

Data	Hora	Dias	FUNDO (°C)		CIMO (°C)	
			Sonda1	Sonda3	Sonda1	Sonda3
14/03/2013	14:50	0,00	14,3	7,1	16,7	10,8
15/03/2013	02:50	0,50	13,2	-4,3	13,8	2,9
15/03/2013	14:50	1,00	11,3	-5,0	11,0	1,9
16/03/2013	02:50	1,50	9,7	-5,2	9,2	0,6
16/03/2013	14:50	2,00	8,5	-5,5	7,9	0,5
17/03/2013	02:50	2,50	7,5	-5,9	7,0	0,1
17/03/2013	14:50	3,00	6,8	-5,9	6,3	-0,4
18/03/2013	02:50	3,50	6,3	-6,3	5,8	-0,8
18/03/2013	14:50	4,00	5,8	-6,5	5,3	-0,9
19/03/2013	02:50	4,50	5,5	-6,7	5,1	-0,2
19/03/2013	14:50	5,00	5,2	-6,7	4,8	-1,2
20/03/2013	02:50	5,50	5,0	-6,8	4,6	-0,4
20/03/2013	14:50	6,00	4,8	-7,0	4,4	-1,2
21/03/2013	02:50	6,50	4,7	-6,7	4,3	-1,5
21/03/2013	14:50	7,00	4,6	-7,0	4,2	-1,6
22/03/2013	02:50	7,50	4,5	-6,8	4,2	-0,3
22/03/2013	14:50	8,00	4,4	-6,9	4,1	-0,6
23/03/2013	02:50	8,50	4,4	-6,9	4,1	-0,5
23/03/2013	14:50	9,00	4,3	-7,5	4,0	-0,4
24/03/2013	02:50	9,50	4,3	-6,6	3,9	-0,6
24/03/2013	14:50	10,00	4,3	-7,2	3,9	-0,7
25/03/2013	02:50	10,50	4,2	-7,0	3,8	-0,4
25/03/2013	14:50	11,00	4,2	-7,1	3,8	-1,8
26/03/2013	02:50	11,50	4,1	-6,8	3,7	-1,2
26/03/2013	14:50	12,00	4,1	-6,8	3,7	-1,2
27/03/2013	02:50	12,50	4,1	-6,2	3,8	-0,5
27/03/2013	14:50	13,00	4,1	-7,4	3,8	-1,6
28/03/2013	02:50	13,50	4,2	-7,0	3,8	-0,9
28/03/2013	14:50	14,00	4,2	-7,0	3,8	-0,5
29/03/2013	02:50	14,50	4,2	-7,1	3,8	-1,5
29/03/2013	14:50	15,00	4,2	-7,4	3,8	-1,5
30/03/2013	02:50	15,50	4,2	-7,4	3,8	-0,9
30/03/2013	14:50	16,00	4,2	-7,1	3,8	-1,3
31/03/2013	02:50	16,50	4,2	-7,2	3,8	-1,0
31/03/2013	14:50	17,00	4,2	-7,4	3,7	-0,7
01/04/2013	02:50	17,50	4,1	-7,7	3,7	-1,3
01/04/2013	14:50	18,00	4,1	-7,3	3,6	-1,1
02/04/2013	02:50	18,50	4,1	-7,3	3,6	-0,9
02/04/2013	14:50	19,00	4,1	-7,2	3,5	-1,0
03/04/2013	02:50	19,50	4,1	-7,8	3,6	-2,4

Anexo VI- Registo de temperaturas no modelo teórico

Tabela 20- Dados sonda 1 cimo - modelo teórico

Nó (1,70004 ; 1,80005)	
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	22,000
0,5	7,854
1,0	3,887
1,5	2,797
2,0	2,408
2,5	2,206
3,0	2,084
3,5	1,990
4,0	1,909
4,5	1,852
5,0	1,821
5,5	1,775
6,0	1,674
6,5	1,547
7,0	1,372
7,5	1,185
8,0	1,059
8,5	0,962
9,0	0,851
9,5	0,651
10,0	0,525
10,5	0,467
11,0	0,430
11,5	0,405
12,0	0,377
12,5	0,357
13,0	0,341
13,5	0,328
14,0	0,325
14,5	0,322
15,0	0,320
15,5	0,317
16,0	0,306
16,5	0,287
17,0	0,276
17,5	0,268
18,0	0,261
18,5	0,256
19,0	0,252
19,5	0,251
20,0	0,251

Tabela 21- Dados sonda 1 fundo - modelo teórico

Nó (1,70014 ; 1,15009)	
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	22,000
0,5	10,281
1,0	5,509
1,5	3,940
2,0	3,325
2,5	3,020
3,0	2,843
3,5	2,706
4,0	2,618
4,5	2,542
5,0	2,475
5,5	2,391
6,0	2,290
6,5	2,176
7,0	1,976
7,5	1,759
8,0	1,596
8,5	1,534
9,0	1,439
9,5	1,263
10,0	1,135
10,5	1,002
11,0	0,921
11,5	0,882
12,0	0,863
12,5	0,847
13,0	0,805
13,5	0,764
14,0	0,740
14,5	0,730
15,0	0,691
15,5	0,588
16,0	0,546
16,5	0,536
17,0	0,534
17,5	0,533
18,0	0,533
18,5	0,533
19,0	0,533
19,5	0,532
20,0	0,532

Tabela 22- Dados sonda 3 cimo - modelo teórico

Nó (1,27062 ; 1,8006)	
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	6,416
0,5	-4,336
1,0	-5,406
1,5	-5,948
2,0	-6,123
2,5	-6,178
3,0	-6,202
3,5	-6,233
4,0	-6,245
4,5	-6,252
5,0	-6,259
5,5	-6,262
6,0	-6,263
6,5	-6,264
7,0	-6,264
7,5	-6,265
8,0	-6,266
8,5	-6,267
9,0	-6,267
9,5	-6,269
10,0	-6,270
10,5	-6,270
11,0	-6,270
11,5	-6,270
12,0	-6,270
12,5	-6,270
13,0	-6,270
13,5	-6,270
14,0	-6,270
14,5	-6,270
15,0	-6,270
15,5	-6,270
16,0	-6,270
16,5	-6,270
17,0	-6,270
17,5	-6,270
18,0	-6,270
18,5	-6,270
19,0	-6,270
19,5	-6,270
20,0	-6,270

Tabela 23- Dados sonda 3 fundo - modelo teórico

Nó (1,27004 ; 1,31009)	
Tempo (dias)	Temperatura (°C)
0,0	6,80801
0,5	-4,63207
1,0	-5,99795
1,5	-6,73998
2,0	-7,04479
2,5	-7,14128
3,0	-7,21327
3,5	-7,24605
4,0	-7,27642
4,5	-7,30059
5,0	-7,31056
5,5	-7,33455
6,0	-7,34129
6,5	-7,34240
7,0	-7,34874
7,5	-7,34968
8,0	-7,34996
8,5	-7,35012
9,0	-7,35023
9,5	-7,35036
10,0	-7,35042
10,5	-7,35033
11,0	-7,35024
11,5	-7,35015
12,0	-7,35007
12,5	-7,34971
13,0	-7,35202
13,5	-7,35253
14,0	-7,35261
14,5	-7,35262
15,0	-7,35262
15,5	-7,35262
16,0	-7,35263
16,5	-7,35263
17,0	-7,35263
17,5	-7,35263
18,0	-7,35263
18,5	-7,35263
19,0	-7,35263
19,5	-7,35263
20,0	-7,35263